

# **Otimização de uma Linha de Produção de Derivados de Madeira**

Relatório de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica

**Autor**

**João Pedro Gomes Ferreira**

**Orientadores**

**Professor Doutor Luis Manuel Ferreira Roseiro**

Professor Coordenador

**Professor Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão**

Professor Adjunto

**Coimbra, dezembro de 2016**



*“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais inteligência.”*

**Henry Ford**



## AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, contribuíram diversas pessoas, a quem gostaria de expressar o meu sincero agradecimento:

- Em primeiro lugar os agradecimentos são dirigidos aos meus pais Idílio Ferreira e Maria de Lurdes Ferreira. Sem eles teria sido, de todo, impossível percorrer todo este caminho e, agora, dar por terminada esta etapa. Acompanharam-me do princípio ao fim.
- À minha namorada, Tânia Paiva, que foi incansável durante todo este percurso, acompanhou e ajudou sempre que possível, suportando por vezes momentos menos bons, principalmente, nesta ultima fase, mas ajudando sempre com o objetivo de conseguir uma orientação para o caminho certo.
- À minha irmã, Filipa Ferreira, que sempre me incentivou a seguir o meu objetivo e me ajudou a adquirir conhecimentos, tendo em base a sua experiência.
- Ao Professor Doutor Luís Roseiro, que para além de um dos meus orientadores deste trabalho foi, sem dúvida, uma grande ajuda para a sua realização. Todas as suas dicas e opiniões foram essenciais para que este projeto corresse da melhor maneira e até ao último momento teve sempre uma palavra de incentivo e confiança, ajudando sempre em tudo e em qualquer situação.
- Ao Professor Doutor Pedro Beirão, também meu orientador, por toda a ajuda disponibilizada, pela sua prontidão para esclarecimentos, dúvidas ou qualquer outro problema, por todo o conhecimento que me transmitiu sem qualquer reserva, por todos os conselhos que me deu, mesmo às vezes fora de horas e ainda por todo o incentivo e apoio, não só neste trabalho, mas também em todos os outros em que esteve envolvido comigo e que levou mesmo até ao reconhecimento público.
- Ao Eng.º Luís Lobo pela disponibilidade demonstrada desde que comecei a fazer parte da empresa Pellets Power. Mesmo sabendo que a realização deste trabalho me iria impedir de me dedicar a 100% à empresa, sempre me deixou livre de fazer as minhas escolhas, nunca descurando o meu papel na empresa.
- Ao Marco Rodrigues, amigo e colega de trabalho que me recebeu e ensinou muitas coisas, com as quais aprendi e continuo a aprender.
- Ao Marco Tomé grande amigo e colega de faculdade. Foi, durante todo o meu percurso, um grande companheiro e, nesta parte final, um grande apoio para conseguir terminar esta etapa, deixando os seus afazeres para me dar ajuda em qualquer momento deste percurso.
- À minha tia Elisabete e à minha avó Noémia, que sempre fizeram questão de acompanhar o meu percurso de perto e garantir que tudo corria bem, tendo sempre demonstrado disponibilidade para ajudar no que precisasse.
- Aos meus sogros, que sempre se disponibilizaram a ajudar no que fosse necessário e sempre demonstraram preocupação e interesse durante este período.
- Aos meus amigos Nuno e Filipa, que são como irmãos e a quem agradeço pela presença durante este percurso mesmo sabendo que nem sempre estaria disponível para eles.

- Ao Edgar e à Débora, grandes amigos de há muitos anos e pessoas imprescindíveis para o meu percurso.
- Ao Ricardo Pereira, colega de curso e, sobretudo, amigo de longa data. A sua presença durante a minha vida académica só reforçou mais a grande amizade já existente e permitiu que partilhássemos muitos bons momentos.
- À Rita Varela, que embora faça parte da minha vida há pouco tempo, desde logo demonstrou grande apoio e disponibilidade para o que necessitasse.
- Ao Raimundo, Daniel e Miguel, grandes amigos e companheiros de curso que, apesar de trilhos diferentes, sempre estão presentes.
- Por fim, mas não menos importante, à Pellets Power, empresa que me acolheu e me ensinou e ajudou a adquirir inúmeros conhecimentos e me facilitou na realização deste trabalho.

A todos o meu muito obrigado e mais sincero reconhecimento pelo seu contributo e por toda a paciência que tiveram.

## RESUMO

O presente relatório de projeto descreve o trabalho desenvolvido em colaboração com a empresa Pellets Power, unidade industrial de fabrico de *pellets* do grupo Gesfinu, sediada no concelho de Mortágua. A Pellets Power integra uma linha de produção onde se identificam três zonas principais: zona de verdes, zona de secos e zona de granulação/produto acabado. Opera vinte e quatro horas por dia, sete dias por semana, o que implica que todos os equipamentos estejam sempre nas melhores condições de serviço. Recentemente a Pellets Power identificou diversos problemas com o crivo de processo, um equipamento situado na zona de verdes, essencial para garantir a velocidade de produção da unidade industrial. Após a análise da situação e, atendendo aos custos de manutenção associados a este equipamento, foi decidido pela empresa implementar uma alternativa que garanta, no mínimo, a mesma produção, mas que não seja tão dispendiosa, tanto em termos de aquisição do equipamento, como na sua manutenção posterior. Assim, este projeto assentou no desenvolvimento e implementação de uma solução alternativa que tenha como base os pressupostos identificados pela empresa. O desenvolvimento do projeto conduziu à introdução de três novos equipamentos na zona de verdes: um para aumentar a quantidade de rolaria a ser destróçada e dois para substituir o crivo do processo.

**Palavras-Chave:** Madeira, estilha, crivo, otimização, produção





## **ABSTRACT**

This project report describes the work developed in collaboration with Pellets Power, an industrial plant for the manufacture of pellets of the Gesfinu group, based in the municipality of Mortágua. Pellets Power integrates a production line where three main zones are identified: green zone, dry zone and granulation zone / finished product. It operates twenty-four hours a day, seven days a week, which implies that all equipment is always in the best conditions of service. Recently, Pellets Power identified several problems with the process sieve, an equipment located in the green zone, essential to guarantee the production speed of the industrial unit. After analyzing the situation, and considering the maintenance costs associated with this equipment, it was decided by the company to implement an alternative that guarantees at least the same production, but which is not as expensive, both in terms of equipment acquisition and in its subsequent maintenance. Thus, this project was based on the development and implementation of an alternative solution based on the assumptions identified by the company. The development of the project led to the introduction of three new equipment's in the green zone: one to increase the amount of rolled products that can be destroyed and two to replace the process sieve.

**Keywords:** Wood, chip, sieve, optimization, production



# ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE GERAL .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO DE PROJETO.....	7
<b>2 CRIVO DE ESTRELAS .....</b>	<b>9</b>
2.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	9
2.2 CONCEÇÃO .....	10
2.3 AJUSTES DURANTE O FUNCIONAMENTO .....	14
2.4 MELHORIAS FUTURAS .....	15
<b>3 CRIVO ROTATIVO .....</b>	<b>17</b>
3.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	17
3.2 CONCEÇÃO .....	18
3.3 DIMENSIONAMENTOS .....	22
3.3.1 <i>Dimensionamento pelo método de elementos finitos</i> .....	23
3.4 AJUSTES DURANTE O FUNCIONAMENTO .....	30
3.5 MELHORIAS FUTURAS .....	30
<b>4 DESENVOLVIMENTO DE UM RACHADOR .....</b>	<b>33</b>
4.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	33
4.2 CONCEÇÃO .....	34
4.3 ESTUDO ESTRUTURAL.....	38
4.3.1 <i>Chapa móvel</i> .....	40
4.3.2 <i>Passagem de força</i> .....	44
4.3.3 <i>Chapa fixa</i> .....	45
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>6 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>49</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matéria-prima (esquerda) Produto final (direita) .....	1
Figura 2 - Esquema geral da linha de produção. ....	2
Figura 3a) - Matéria-prima e destorroador; b) - Mistura de estilha e serrim .....	3
Figura 4 – Saída de serrim do crivo e saída de material dos moinhos de verde.....	3
Figura 5 - <i>Pellet</i> a granel (esquerda) e <i>pellet</i> embalado (direita) .....	4
Figura 6 - Crivo de processo .....	5
Figura 7 – Funcionamento do crivo de processo .....	5
Figura 8 – Deterioração do crivo de processo .....	6
Figura 9 - Esquema de localização da intervenção.....	7
Figura 10 - Estilha grosseira.....	9
Figura 11 – Modelo 3D do crivo de estrelas .....	10
Figura 12 – Visualização 3D dos roletes .....	11
Figura 13 - Disco de separação.....	11
Figura 14 - Casquilhos de separação .....	12
Figura 15 - Espaçamento entre discos e roletes consecutivos .....	12
Figura 16 - Espaçamento entre roletes .....	13
Figura 17 - Cremalheiras utilizadas.....	13
Figura 18 - Crivo de estrelas completo.....	14
Figura 19 - Imagem do mexedor em funcionamento .....	15
Figura 20 - Crivo rotativo (Premier Tech Chronos, 2013) .....	17
Figura 21 - Crivo rotativo.....	18
Figura 22 - 3D de esquematização da estrutura do tambor .....	19
Figura 23 - Sem-fim de extração do tambor.....	19
Figura 24 - Corte da estrutura completa .....	20
Figura 25 - Elemento de fixação tambor ao tubo mecânico e sua disposição .....	20
Figura 26 - Inclinação do crivo rotativo .....	21
Figura 27 – Elemento tetraédrico com 10 nós e 3 GL por nó .....	24
Figura 28 - Definição do modelo 3D para estudo .....	24
Figura 29 - Convergência de malha pelos deslocamentos máximos .....	25
Figura 30 - Convergência de malha pela tensão de Von Mises.....	26

Figura 31 - Detalhes da malha .....	27
Figura 32 - Relação de aspeto .....	27
Figura 33 - Malhagem final .....	28
Figura 34 – Distribuição das tensões equivalente de von Mises [MPa] .....	28
Figura 35 - Pormenor da tensão equivalente de von Mises nos elementos de fixação do tambor ao tubo.....	29
Figura 36 – Distribuição dos deslocamentos resultantes .....	29
Figura 37 - Escova rotativa (Maia & Maia – Indústria de Escovas e Similares LDA., 2014). 31	
Figura 38 - Esquema de funcionamento do destroçador.....	33
Figura 39 - Diferentes modelos de rachador <i>WoodCraker</i> , gama L (WesttecH Maschinenbau GmbH, 2016). .....	34
Figura 40 - Modelo 3D do rachador.....	35
Figura 41 - Bases laterais de suporte .....	35
Figura 42 - Garra fixa.....	35
Figura 43 - Garra móvel.....	36
Figura 44 - Cilindros hidráulicos .....	36
Figura 45 - Cavilha base do cilindro hidráulico.....	37
Figura 46 - Elemento de fixação ao chão.....	37
Figura 47 - Rachador: pormenores de construção com garras abertas .....	38
Figura 48 - Rachador: pormenores de construção com garras fechadas .....	38
Figura 49 - Elemento tetraédrico com 4 nós e 3 GL por nó.....	39
Figura 50 - Modelo de elementos finitos da chapa móvel .....	40
Figura 51 - Definições atribuídas no software para a convergência da malha .....	41
Figura 52 - Malhagem geral (esquerda) e pormenor junto ao suporte do gume de corte (direita).....	41
Figura 53 - Gráficos de convergência (h-adaptativo) .....	42
Figura 54 – Distribuição das tensões equivalentes de von Mises .....	42
Figura 55 – Distribuição dos deslocamentos resultantes .....	43
Figura 56 - Forças resultantes nas faces de fixação .....	44
Figura 57 - Colocação das Fixações e Forças .....	45
Figura 58 – Distribuição das tensões equivalentes de von Mises .....	46
Figura 59 – Distribuição dos deslocamentos resultantes .....	46

## Símbolos e Abreviaturas

$P$  – perímetro

3D – três dimensões

$V$  – volume

$V_{tb}$  – volume tubo mecânico

$V_{fit}$  – volume fixação tambor ao tubo mecânico

$V_{sf}$  – volume sem-fim

$d$  – diâmetro





# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

Os *pellets* de madeira são uma fonte de energia renovável pertencente à classe da biomassa e são um combustível sólido, constituído por granulado de resíduos de madeira prensada. Podem ser obtidos a partir diversos tipos de madeira, em grosso ou sob forma de desperdício, sendo por isso uma boa forma de aproveitar os restos de lenha disponibilizados, por exemplo após o corte de pinhais. A Figura 1 ilustra a matéria-prima e o resultado final.

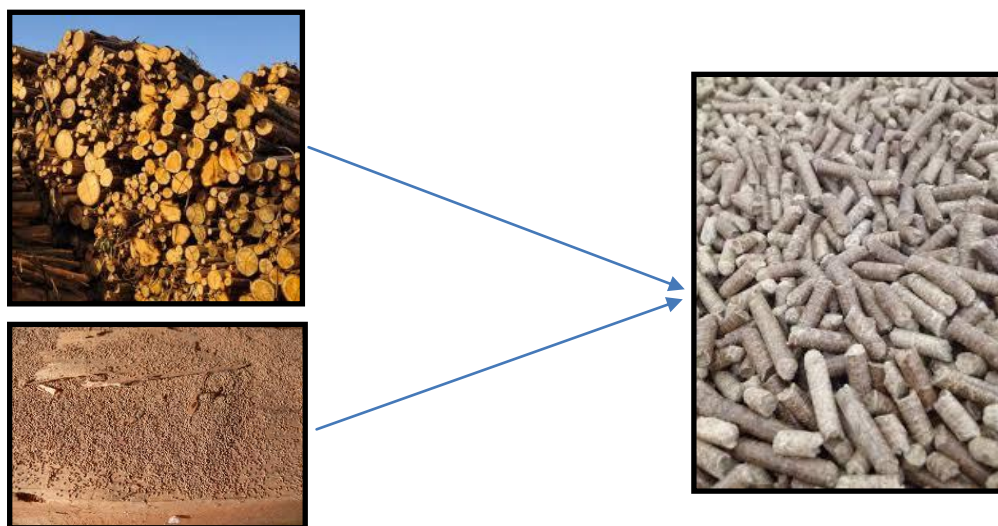


Figura 1 – Matéria-prima (esquerda) Produto final (direita)

Atualmente, a utilização de *pellets* de madeira como combustível é bastante aplicada em fornos de padarias, fornos cerâmicos, aquecimento de estufas, oficinas de pintura de automóveis, estufas de flores, aquecimento de moradias e prédios (*pellets* certificados, produzidos segundo determinadas normas), assim como na indústria de produção de energia elétrica (*pellets* industriais).

Os *pellets* de madeira são granulados cilíndricos com 6 a 8 mm de diâmetro, e com 10 a 40 mm de comprimento. São extremamente densos e devem ser fabricados com um baixo índice de humidade, o que lhes permite serem consumidos e queimados com uma elevada eficiência calorífica. Para obter um rendimento ótimo é necessário fazer uma produção do *pellet* recorrendo a diferentes tipos de madeira com elevado poder calórico. Além disso, a geometria regular e o pequeno tamanho possibilitam uma alimentação contínua e calibrada das caldeiras que realizam a combustão dos mesmos.

A alta densidade dos *pellets* de madeira também permitem um armazenamento compacto e um transporte mais económico a longas distâncias. Os *pellets* podem ser facilmente descarregados da cisterna de um camião para o local de armazenamento nas instalações do cliente.

Tal como descrito atrás, esta indústria produz dois tipos de *pellets*, cuja diferença principal envolve o tipo de madeira usada como matéria-prima. O *pellet* certificado (também conhecido por *pellet* doméstico) é produzido a partir de madeira cascada, sendo maioritariamente de pinho, enquanto o *pellet* industrial é produzido a partir de qualquer tipo de madeira, cascada ou não.

No caso da Pellets Power, a unidade industrial apresenta uma única linha de produção, produzindo de modo separado cada um dos produtos acima referidos. Esta linha de produção tem a configuração que se apresenta esquematicamente na Figura 2. Apesar de ter apenas uma linha de produção, a unidade incorpora também uma linha de auxílio, composta por uma fornalha de queima de biomassa para produzir ar quente e vapor de água, essenciais para o funcionamento da linha de produção.

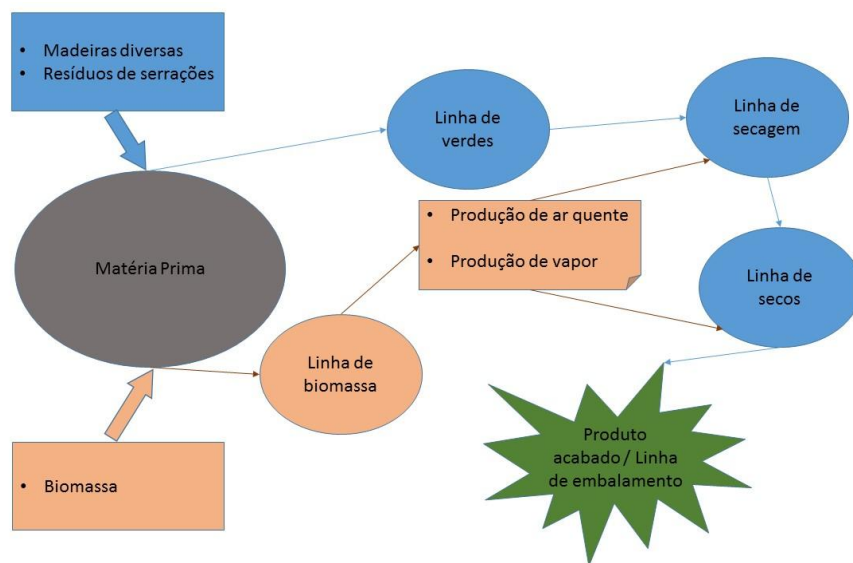


Figura 2 - Esquema geral da linha de produção.

A linha de produção da Pellets Power subdivide-se em três fases principais:

**Linha de Verdes:** Onde a matéria-prima (Figura 3a)), composta por madeira diversa sob forma de toros, é reduzida a estilha, através do destrocador, também designado por estilhadora. De seguida, a matéria-prima é encaminhada para um armazém coberto (designado também por *box*), onde é misturada com outras matérias-primas (serrim diverso). A Figura 3b) mostra a mistura de estilha e serrim. É a partir deste armazém que é alimentada a restante linha de produção consoante a necessidade, fazendo passar esta mistura de estilha e serrim

pelo crivo de processo, onde é separado o serrim da estilha com tamanho aceitável. Aqui, a estilha grosseira é rejeitada e o serrim é encaminhado para um silo de armazenamento. A estilha que não é rejeitada segue para os moinhos de martelos, também designado por moinho de verde, onde é reduzido o seu tamanho. Posteriormente é encaminhada para o mesmo silo. A Figura 4 mostra a saída de material dos moinhos de martelos.



a)



b)

**Figura 3a) - Matéria-prima e destrocador; b) - Mistura de estilha e serrim**



**Figura 4 – Saída de serrim do crivo e saída de material dos moinhos de verde**

**Linha de Secagem:** Nesta linha é aproveitado o calor proveniente da fornalha para fazer passar a mistura de material, de modo a retirar alguma da humidade. O material segue então para outro silo.

**Linha de Secos:** Na linha de secos, o material é conduzido por um crivo que separa os elementos mais finos (serrim). O restante material segue para um grupo de moinhos de

martelos de configuração diferente, que garante a homogeneização de todo o material em termos de tamanho, normalmente quanto mais em forma de serrim (designado por pó de *pellet*), melhor. De seguida o material segue para as granuladoras onde é formado o *pellet*.

O produto acabado, já sob forma de *pellet*, é armazenado em silos para venda a granel ou embalado, para comercialização sob forma de saco (Figura 5).



**Figura 5 - Pellet a granel (esquerda) e pellet embalado (direita)**



## 1.2 Objetivos

Os objetivos deste projeto inserem-se no procedimento de intervenção na linha de verdes, em particular no crivo de processo. Nesta linha, o crivo de processo, visível na Figura 6, apresentava um estado de deterioração bastante avançado, com elevados custos de manutenção.



**Figura 6 - Crivo de processo**

O crivo de processo existente era um equipamento com funcionamento oscilante, a partir de um veio excêntrico, visível na Figura 7, que garantia a separação de três componentes em três fases distintas. A separação era garantida por chapas perfuradas com diâmetros de furos adequados ao tamanho do material que se pretendia deixar passar.



**Figura 7 – Funcionamento do crivo de processo**

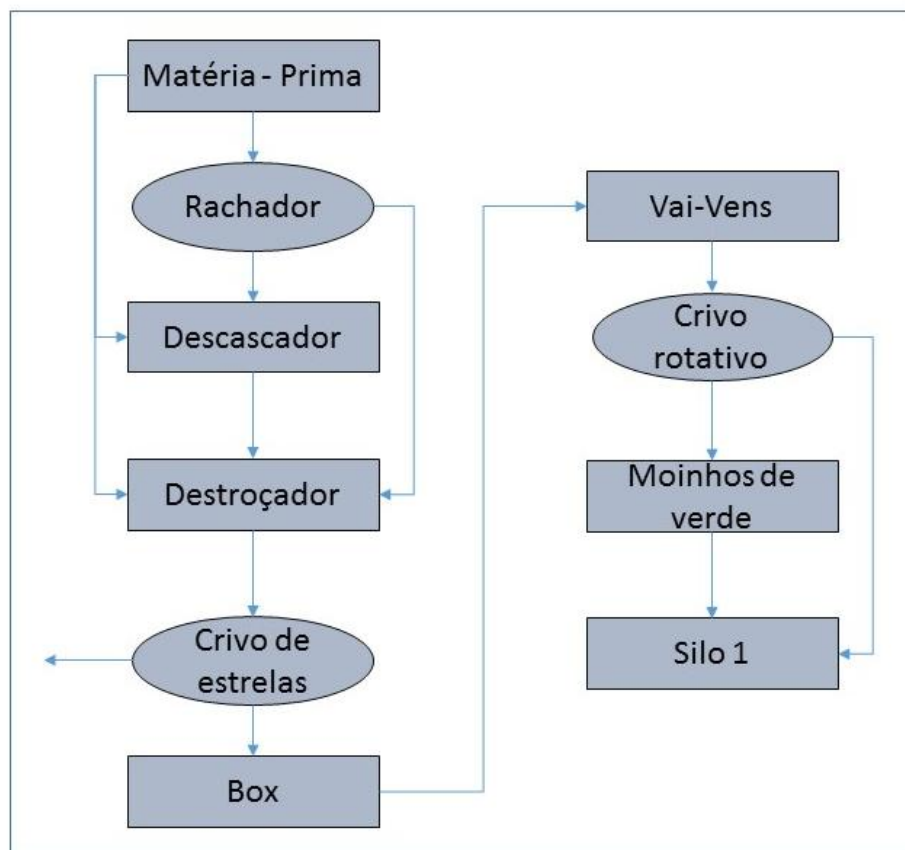
O crivo separava a estilha mais grossa que era rejeitada (voltando para o destroçador), o serrim que era encaminhado diretamente para o silo de armazenamento, enquanto a restante estilha seguia para os moinhos de verde. Numa fase ainda prematura do projeto este crivo acabou por ceder por completo (Figura 8), tornando impossível o seu eventual reaproveitamento.



**Figura 8 – Deterioração do crivo de processo**

Com a paralisação deste crivo, todo material que era separado passou a entrar nos moinhos de verde, baixando o rendimento e atrasando, assim a produção. Deste modo, tornou-se fundamental projetar uma alternativa a curto prazo. Tendo em consideração que o custo de aquisição de um crivo novo com características semelhantes seria dispendioso e obrigaria a procedimentos de manutenção difíceis de implementar dada a sua dimensão e forma construtiva, a Pellets Power optou por projetar e implementar um novo equipamento que garantisse a separação dos três produtos diferentes. Assim, após uma análise mais detalhada, a alternativa para este equipamento foi direcionada para a implementação sequencial de um primeiro crivo para a separação inicial do material grosso e alguma casca (crivo de estrelas) e de um segundo crivo (rotativo), para separar os restantes componentes (serrim e a estilha) que não sejam rejeitados pelo crivo de estrelas.

No decorrer do projeto dos dois crivos, surgiu também a ideia de projetar um equipamento para introduzir na linha de produção, junto do abastecimento do destroçador (Figura 9), evitando a seleção e armazenamento de toros com diâmetro superior ao que o destroçador consegue suportar. Neste seguimento, foi pedido pela direção da unidade industrial, o projeto de um rachador, tendo como referência a gama L dos modelos comercializados pela marca *WoodCraker* (WesttecH Maschinenbau GmbH, 2016).



**Figura 9 - Esquema de localização da intervenção**

Importa referir que estes três equipamentos poderiam ser adquiridos prontos a serem instalados, contudo, o custo de aquisição seria elevado. Tendo em conta que esta unidade industrial possui uma oficina mecânica, foi estratégia da empresa que os equipamentos fossem projetados de acordo com a possibilidade de serem construídos e montados na própria empresa. Assim, o projeto que se descreve inclui a descrição das soluções projetadas e implementadas, tendo em conta as condicionantes existentes, em particular as disponibilidades de execução dentro da própria unidade industrial.

### 1.3 Estrutura do Relatório de Projeto

O relatório de projeto está organizado em cinco capítulos principais.

Um primeiro capítulo, introdutório, com um enquadramento geral do trabalho realizado e de seguida, um capítulo por cada equipamento em particular.

No segundo capítulo é abordado o crivo de estrelas, sendo justificada a sua escolha, o modo de funcionamento, como foi projetado e os cálculos necessários ao seu dimensionamento e

projeto. É também descrito de forma sucinta como foi montado e instalado no local de funcionamento. Por fim, neste capítulo são ainda abordadas as alterações necessárias aquando do seu início de funcionamento em contínuo.

No terceiro capítulo é abordado o crivo rotativo. A metodologia empregue é idêntica ao capítulo anterior.

O quarto capítulo descreve o projeto, dimensionamento estrutural e hidráulico do rachador. Apesar deste equipamento ainda não ter sido construído por razões alheias a este trabalho, dada a sua importância opta-se por se apresentar o projeto que o sustenta.

Finalmente, um capítulo dedicado às conclusões extraídas do trabalho desenvolvido e implementado.



## 2 Crivo de estrelas

Este capítulo descreve os principais aspetos relativos à conceção, projeto e implementação do crivo de estrelas, o primeiro equipamento que se apresenta neste trabalho de projeto.

### 2.1 Descrição geral

O crivo de estrelas, também conhecido como crivo de discos, é um equipamento de alta eficiência, composto por uma ou várias secções de separação, com diferentes espaçamentos entre os discos em cada secção. É um sistema de crivagem compacto e silencioso. É caracterizado também por ser possível a sua instalação em qualquer local, pois os fabricantes destes equipamentos alegam que é isento de vibrações. É um equipamento de fácil manutenção e de ótima acessibilidade. Para este caso em particular, este equipamento apenas vai separar dois componentes, sendo então o espaçamento entre os discos (estrelas) igual em toda a dimensão do crivo.

Como descrito no capítulo introdutório deste relatório, este equipamento é projetado para substituir a primeira fase de separação do crivo do processo, ou seja, irá separar logo à partida a estilha grosseira da restante.

Foi referido também, anteriormente, que este equipamento vai ser instalado na linha de produção, mas num local diferente do anterior crivo de processo, como esquematiza a Figura 9. Ao ser instalado logo a seguir ao destroçador, este equipamento rejeita da linha de produção a estilha grosseira (Figura 10), visto que este material é grande demais para poder ir para os moinhos de verde.



**Figura 10 - Estilha grosseira**

Esta localização foi também escolhida para que os rejeitados fiquem logo no parque de matéria-prima onde operam as máquinas (pá carregadora) que encaminham estes rejeitados de novo para um dos destroçadores ou então para armazenamento para serem utilizados posteriormente.

O crivo de estrelas tem um método de funcionamento muito simples e isso reflete-se, também, na simplicidade construtiva. Neste caso em concreto, devido ao seu funcionamento, o material a aproveitar é o que passa por intermédio dos espaçamentos dos discos e cai no tapete que vai para a *box* de armazenamento. O material restante é rejeitado para um outro tapete na saída superior do crivo.

Tendo em conta esta descrição, a maior razão pela escolha de um equipamento deste tipo é o local da instalação. Este equipamento é projetado para ser instalado por cima do tapete que leva o material desde o destroçador até à *box*. Assim, na *box*, fica apenas a chamada estilha limpa (estilha média e serrim).

## 2.2 Conceção

O crivo de estrelas (Figura 11) é constituído por uma sequência de roletes com o mesmo distanciamento, apoiados através de chumaceiras em duas vigas paralelas. O acionamento destes roletes é feito por cremalheiras apenas com um órgão motor (motor elétrico), passando o movimento rotativo de uns roletes para os outros.

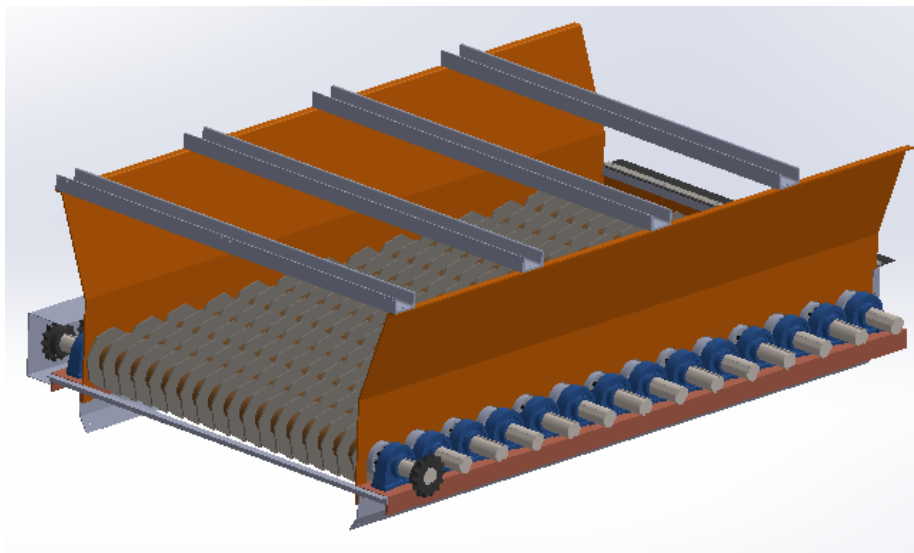
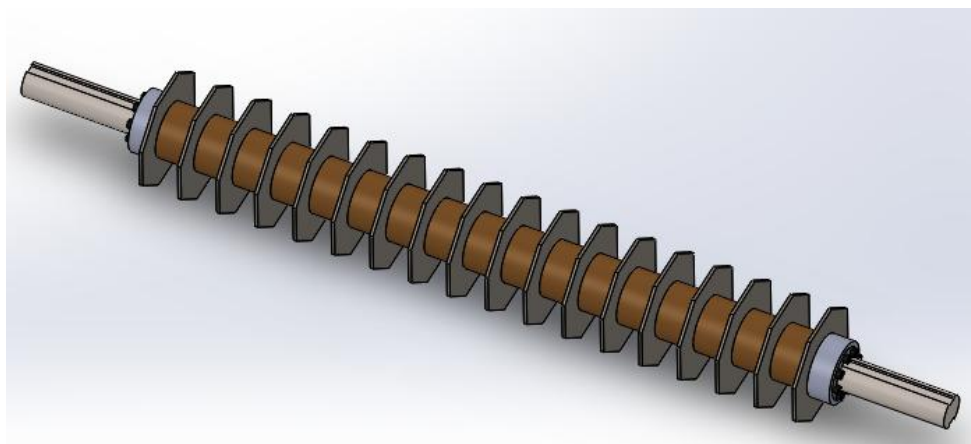


Figura 11 – Modelo 3D do crivo de estrelas

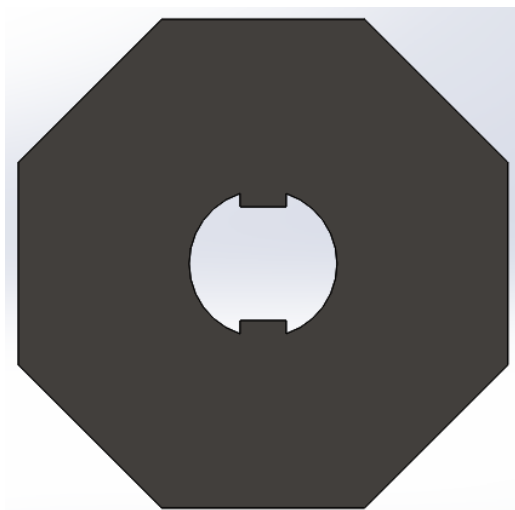
O distanciamento entre as duas vigas é a largura útil do crivo enquanto o comprimento pode ser ajustável, aumentando ou diminuindo o número de roletes.

Este crivo é composto essencialmente por roletes que, por sua vez, são constituídos por um veio, discos, casquilhos de separação de buchas de fixação, chumaceiras, cremalheiras, vigas e duas chapas laterais. Existe um veio de suporte onde estão inseridos os discos separados por casquilhos, posicionados no veio através de duas buchas de fixação que os mantêm na posição pretendida. Este veio é suportado em chumaceiras apertadas nas vigas paralelas.



**Figura 12 – Visualização 3D dos roletes**

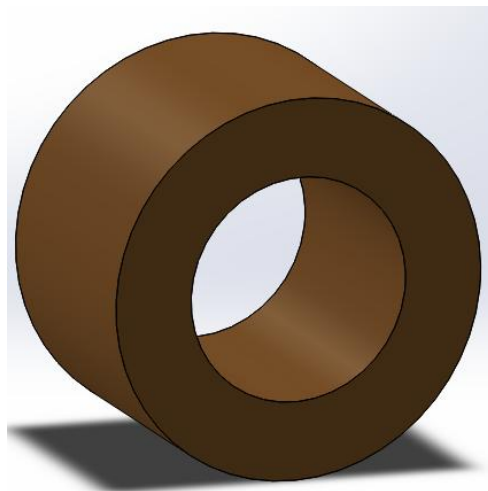
O disco, com uma geometria octogonal (Figura 13) tem a função de movimentar o material na vertical, fazendo com que a estilha média passe pelo espaçamento entre os discos e a estilha grosseira passe de disco para disco até à saída superior, para ser rejeitada.



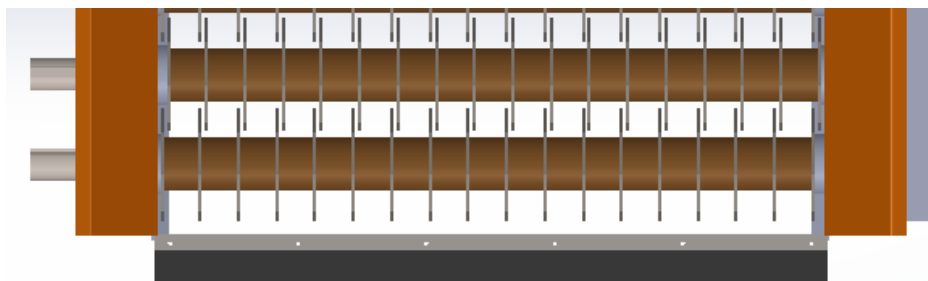
**Figura 13 - Disco de separação**

O movimento de rotação é transposto do veio para o disco por escatelamento do veio nas zonas onde o disco encaixa. A geometria do disco já tem a forma de encaixe evitando-se assim a utilização de um escatel ao longo do veio.

Os casquilhos de separação (Figura 14) têm movimento de rotação livre, ou seja, podem ou não rodar solidariamente com o veio. Assim, se algum elemento de estilha encravar entre dois casquilhos ou entre o casquilho e um disco, este pode parar o movimento de rotação e os restantes elementos do rolete continuam a rodar. Estes casquilhos foram dimensionados de maneira a garantir o distanciamento entre os discos e os casquilhos dos roletes consecutivos, adequado ao tamanho de estilha a separar (Figura 15).



**Figura 14 - Casquilhos de separação**



**Figura 15 - Espaçamento entre discos e roletes consecutivos**

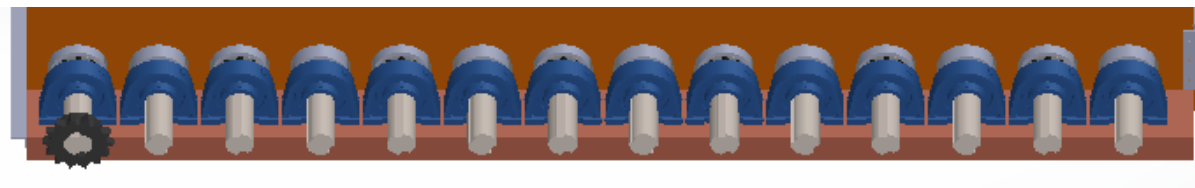
A estilha média (material a aproveitar) é escolhida de acordo com o espaçamento definido. A medida do espaçamento para este crivo foi retirada a partir da medida dos furos das redes de crivagem do antigo crivo de processo, sendo este valor próximo de 45 mm.

As buchas de fixação são um elemento mecânico padrão, sendo colocadas no veio para manter a posição dos dois elementos referidos acima.

Os veios são os elementos de suporte dos componentes referidos nos parágrafos anteriores e garantem a transmissão do movimento de rotação para os discos, devido ao acoplamento do tipo escatel.

As chumaceiras são os apoios do veio e apertam nas vigas de suporte. O tipo de chumaceira, PSHE 50, foi escolhido devido ao espaçamento máximo entre cada conjunto de roletes, este

tipo é o mais compacto para estas situações. Quanto maior a chumaceira, maior teria de ser o diâmetro exterior dos casquilhos de separação e também dos discos.

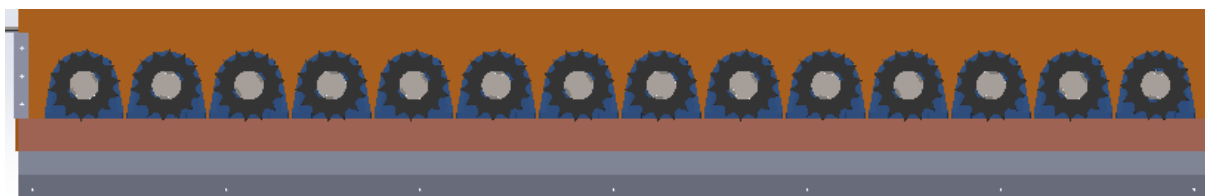


**Figura 16 - Espaçamento entre roletes**

As vigas de suporte são do tipo UPN, sendo nestes elementos que as chumaceiras encaixam. Posteriormente, aquando da montagem do crivo no local definido, é também a partir destas que ancoram os apoios do crivo.

As chapas laterais visíveis na Figura 11 servem para acomodar o material no crivo. Têm encaixe para os roletes, apertando nas vigas de suporte na lateral interior, fazendo com que o material que passa pelos espaçamentos (material crivado) seja encaminhado para o tapete e não passe para as chumaceiras.

Todos os veios são equipados com cremalheiras, sendo que o movimento vai sendo transmitido de umas para as outras através de correntes. As cremalheiras foram seleccionadas de acordo com a distância existente entre dois roletes consecutivos, onde têm de trabalhar as duas metades de cremalheira e duas correntes (a que traz o movimento do rolete anterior e a que transmite para o rolete seguinte).



**Figura 17 - Cremalheiras utilizadas**

O acionamento do conjunto é efetuado com uma transmissão por corrente, em que o órgão motor será um motor elétrico. Esta transmissão é efetuada para o último rolete do crivo, sendo os outros movimentados de acordo com o descrito acima.

Como as cremalheiras do órgão movido (crivo) têm dimensão fixa, a velocidade de rotação deste é determinada pela velocidade de rotação do motor e pela dimensão (número de dentes) do pinhão (cremalheira motora, acoplada no motor elétrico).

A Figura 18 mostra este equipamento já construído, instalado na linha e colocado a funcionar. A limitação principal do projeto do equipamento foi o espaço de instalação. A largura de operação do crivo não pode exceder a largura do tapete, devido à queda de material (estilha

limpa) do crivo para o tapete e a altura do crivo não podia ultrapassar o máximo de altura possível do tapete que eleva a estilha desde o destrocador até ao tapete que vai para a *box*.



Figura 18 - Crivo de estrelas completo

## 2.3 Ajustes durante o funcionamento

A velocidade de rotação ideal para este equipamento não é fácil de projetar, pois depende de vários fatores, nomeadamente:

- Forma como a estilha cai no crivo;
- Densidade da estilha;
- Atuação dos discos sobre a estilha;
- Grau de limpeza da estilha (existência de muita casca e rama na estilha e estilha grosseira);

Todos estes fatores influenciam a velocidade de rotação ideal para o crivo. Por exemplo, se a estilha for densa (como a estilha de pinho verde), elevadas velocidades de rotação facilitam a passagem de estilha pelos espaçamentos, mas se for estilha de eucalipto seco ou queimado (estilha menos densa e com alguma casca), as velocidades de rotação elevadas fazem a estilha passar por cima dos discos, saindo pelo tapete de limpeza e desperdiçando, assim, material.

A velocidade foi então ajustada experimentalmente, testando várias relações de transmissão. Usando um motor com 1490 rpm, concluiu-se que uma relação de transmissão de 1:5 seria satisfatória para a maioria das situações.

Para satisfazer as restantes situações, nomeadamente, quando a estilha é de baixa densidade e/ou muito suja (com muita rama e casca) foi necessário proceder à introdução de um elemento que a retivesse momentaneamente numa das partes do crivo, fazendo com que a estilha média e serrim se separe melhor da restante e, devido à velocidade de rotação dos discos, não passe na sua maioria, para o tapete de saída de estilha grossa.

A Figura 19 mostra o elemento introduzido, denominado mexedor, já em funcionamento. É constituído por um veio ao qual foram acoplados elementos estruturais em forma de varão



que, com o mesmo movimento rotativo do crivo atrasam o movimento linear da estilha ao longo do crivo. O movimento rotativo deste elemento é realizado através de uma transmissão por corrente entre um dos roletes do crivo e o próprio veio, mantendo a velocidade de rotação igual à do crivo (corrente vertical visualizada na Figura 18 e no lado esquerdo da Figura 19).



**Figura 19 - Imagem do mexedor em funcionamento**

Uma outra alteração efetuada durante as primeiras horas de funcionamento do crivo foi a necessidade de introdução de uma proteção adicional à passagem de estilha para as chumaceiras e cremalheiras. Entre as chapas laterais e a viga de suporte existiam folgas, necessárias para o funcionamento dos roletes, mas pelas quais passava a estilha mais fina, contaminando as chumaceiras, cremalheiras e correntes, diminuindo muito a vida útil destes elementos.

A alteração passou pela introdução de uma borracha de vedação entre o último disco de cada lado dos roletes e as chapas laterais. Tendo a noção que a borracha sofrerá desgaste pela passagem de estilha, será necessária a sua substituição. No entanto, esta solução é mais fácil e mais económica quando comparada com a substituição de qualquer uma das chumaceiras ou cremalheiras.

## **2.4 Melhorias futuras**

Uma das melhorias a implementar neste equipamento será a introdução de um sistema de lubrificação automático a todas as chumaceiras, semelhante a um sistema de lubrificação ocasional.

Nas correntes foi detetado, aquando o seu funcionamento, que devido ao ambiente de poeiras em que as correntes trabalham, mesmo com as proteções, estas estão sujeitas a um grande desgaste, necessitando também de lubrificação regular. Torna-se necessário implementar um sistema de fácil acesso para a sua lubrificação sem ser necessário retirar as proteções.

Outra melhoria pertinente seria uma alteração no seu funcionamento ou dimensão, para satisfazer na totalidade quando é efetuada estilha, principalmente, de eucalipto fino e/ou queimado, pois as características de muito baixa densidade e muita casca fazem com que o crivo não consiga separar na totalidade a estilha boa, passando alguma parte dela para o tapete de limpeza, sendo rejeitada. A casca é um problema maior, tendo um efeito de tapete rolante em cima dos discos, não deixando que a restante estilha passe pelos espaçamentos.



## 3 Crivo rotativo

Este capítulo descreve os principais aspetos relativos à conceção, projeto e implementação de um crivo de rotativo, o segundo equipamento que se apresenta neste trabalho de projeto.

### 3.1 Descrição geral

O crivo rotativo, também designado por crivo de tambor, foi projetado para separar dois componentes. É constituído por um tambor rotativo montado sobre uma estrutura ligeiramente inclinada. O tambor pode incorporar um crivo cilíndrico de malha ou como um conjunto de placas perfuradas. Ao rodar, este tambor permite que o componente mais fino passe através dos orifícios, enquanto o componente maior se desloca para a sua extremidade do crivo. Os dois componentes podem ser armazenados separadamente ou recolhidos por transportadoras para processamento posterior (Premier Tech Chronos, 2013).



Figura 20 - Crivo rotativo (Premier Tech Chronos, 2013)

Os crivos deste tipo existentes no mercado (Figura 20) são de apoio externo, isto é, o tambor apoia em dois ou mais conjuntos de rolos, ficando o interior do tambor amplo. Esta é a grande diferença para o projeto do crivo descrito neste documento, em que o apoio do tambor é construído no seu interior.

Importa referir que a alteração atrás mencionada foi essencial para proceder à montagem do crivo em substituição do crivo de processo, no mesmo local, garantindo o aproveitamento de todos os equipamentos de abastecimento e transporte posterior de estilha, como por exemplo, a estrutura de betão existente.

Neste crivo, é realizada a separação do serrim da estilha média. O serrim é encaminhado logo para o silo enquanto a estilha é encaminhada para os moinhos de verde para ser transformada numa espécie de serrim.

O serrim, vindo de serrações e também processado no destroçador, é uma matéria-prima pronta a seguir para a linha de secagem, não necessitando de passar pelos moinhos de verde onde o serrim baixa bastante o seu rendimento (por atascamento dos ciclones e por ser mais um material a passar por eles desnecessariamente). A função deste crivo rotativo é então essencial para aumentar a produção nesta linha.

### 3.2 Conceção

Na Figura 21 é possível visualizar o crivo rotativo que foi projetado, já instalado e pronto a trabalhar, onde se pode observar a estrutura de suporte, o tapete de abastecimento (à esquerda da Figura 21) e o tapete de transporte posterior dos dois componentes separados pelo crivo (à direita e acima da Figura 21), já existentes visto que operavam com o crivo de processo. Perante a situação, o crivo rotativo foi idealizado para ser incorporado com estes componentes, fazendo com que as suas dimensões ficassem confinadas ao espaço existente. As dimensões afetadas são o comprimento e o diâmetro. O comprimento é fixo para poder receber o material do tapete de abastecimento e descarregar a estilha média no tapete que vai para os moinhos. O diâmetro não pode exceder a largura máxima da estrutura de betão já existente.

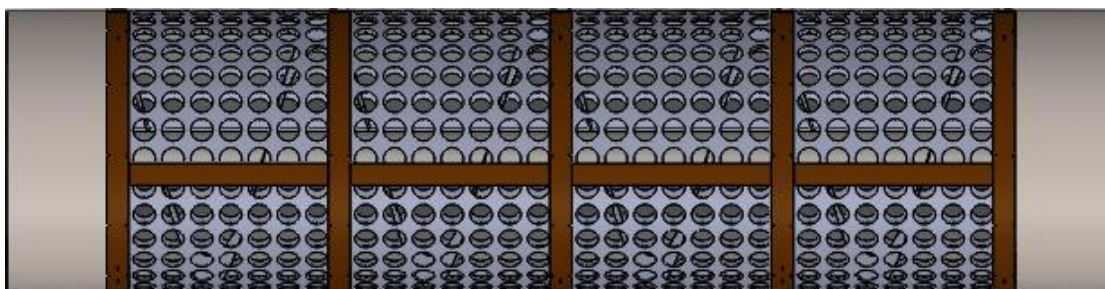


**Figura 21 - Crivo rotativo**

A malha de crivagem utilizada neste crivo é a mesma que era utilizada no crivo de processo para a separação do serrim. É uma malha em rede com furos quadrados de 6 mm, que é calandrada para o diâmetro do crivo.

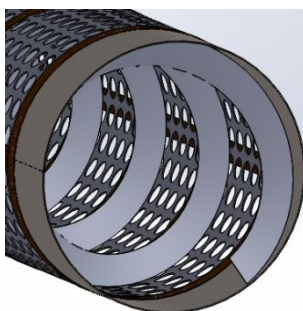
Este crivo é composto pelos seguintes elementos:

- Tambor, que se representa na Figura 22 (visualização simplificada da furação, que na realidade é mais densa);



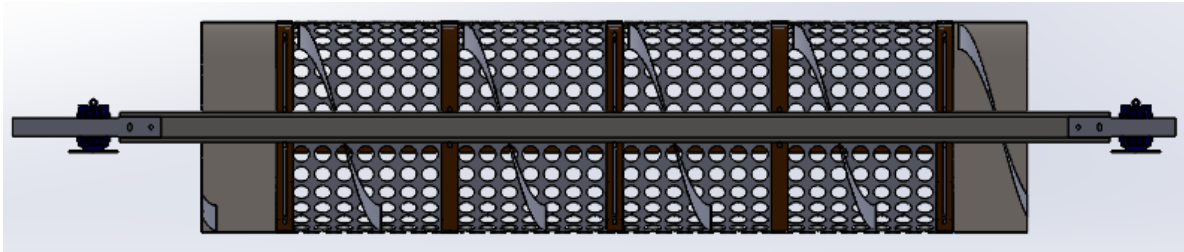
**Figura 22 - 3D de esquematização da estrutura do tambor**

- Entrada e saída do tambor em chapa de aço inox, com características mecânicas para resistir ao desgaste da passagem de material, principalmente na entrada em que a queda é considerável;
- Redes (malhas) de crivagem aparafusadas a chapas de fixação para fácil substituição em caso de desgaste (a furação da Figura 22 não coincide com as redes reais devido à falta de capacidade de processamento informático para proceder à montagem com essas redes);
- Chapas de fixação das malhas, com furação coincidente com a furação da rede, para que em caso de uma das redes sofrer desgaste prematuro ou ser danificada, poder ser substituída facilmente;
- Sem-fim para ajudar a expulsar o material do interior do tambor (Figura 23).

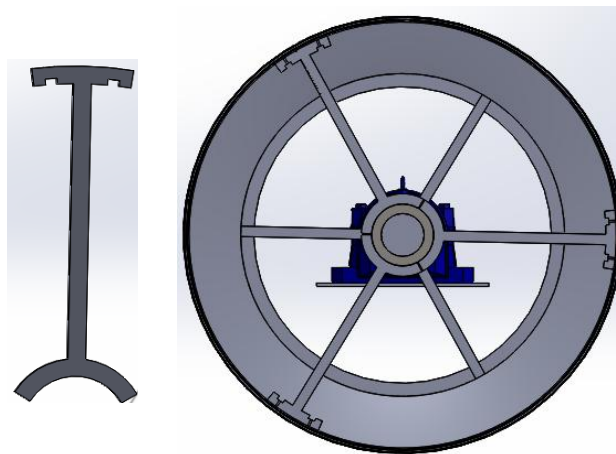


**Figura 23 - Sem-fim de extração do tambor**

- Tubo mecânico de suporte da estrutura (Figura 24);



**Figura 24 - Corte da estrutura completa**



- Elemento de suporte do tambor ao tubo mecânico (Figura 25);

**Figura 25 - Elemento de fixação tambor ao tubo mecânico e sua disposição**

- Veios maquinados de acoplação ao tubo mecânico para incorporar os elementos seguintes;
- Chumaceiras de suporte do crivo;
- Acionamento com motor elétrico e transmissão por corrente.

Para o bom funcionamento deste crivo, a estrutura deve ser ligeiramente inclinada para facilitar a deslocação da estilha ao longo do tambor (Figura 26). Esta inclinação permite que a estilha ao subir nas paredes do tambor e, com o movimento rotativo, aquando da sua queda percorre uma determinada distância longitudinal, o que não aconteceria se o crivo estivesse nivelado. A afinação desta inclinação foi determinada nos testes iniciais de funcionamento do crivo, chegando-se a um valor aceitável de 6°.





**Figura 26 - Inclinação do crivo rotativo**

Um outro parâmetro importante neste crivo é a velocidade de rotação. Esta não pode ser muito baixa devido à estilha dentro do tambor não ser agitada o suficiente para libertar o serrim. Também não pode ser demasiado elevada porque a partir de certo valor de rotação a força centrífuga prevalece sobre a força da gravidade e a estilha “cola” nas paredes do tambor, acabando, assim, o efeito de crivagem.

Após os testes iniciais de funcionamento, recorrendo a um variador de frequência para impor várias velocidades de rotação no tambor, definiu-se uma velocidade de rotação satisfatória de 36 rpm. Este valor teve de ser confirmado para garantir que a rotação do crivo fosse inferior à rotação do tapete de alimentação, podendo, caso isso acontecesse, existir um caudal de alimentação do crivo superior ao máximo que ele conseguiria processar.

A velocidade do tapete de alimentação pode ser calculada a partir da rotação do rolo motor, tendo este uma velocidade de rotação de 134 rpm, o que equivale a 2,23 rotações por segundo.

Sabendo que o rolo motor do tapete tem um diâmetro de 0,3 m, calculando o perímetro  $P_{rolo}$  e multiplicando pela rotação, determina-se a velocidade de alimentação.

$$P_{rolo} = \pi \times \text{diâmetro} \approx 0,942 \text{ m} \quad (1)$$

$$V_{alimentação} = 2,23 \times 0,942 \approx 2,1 \text{ m/s} \quad (2)$$

Este valor de velocidade de alimentação tem, obrigatoriamente, de ser inferior à velocidade de rotação do crivo. Sabendo que o perímetro do tambor do crivo é de 4 m e que se definiu uma velocidade de rotação de 36 rpm, ou seja, 0,6 rotações/segundo, obtém-se uma velocidade para o crivo de:

$$V_{crivo} = 0,6 \times 4 \approx 2,4 \text{ m/s} \quad (3)$$

Comparando as duas velocidades de rotação conclui-se que a velocidade do crivo, para esta rotação, é superior à velocidade do tapete de alimentação do crivo, logo, pode-se assumir esta velocidade de rotação sem ter problemas de atascamento por excesso de alimentação do crivo rotativo.

### 3.3 Dimensionamentos

Para garantir um bom funcionamento deste equipamento, foi necessário proceder ao dimensionamento / validação de alguns componentes mais importantes. Importa referir algumas condicionantes de projeto, nomeadamente o aproveitamento de alguns elementos estruturais existentes.

De seguida são apresentados dados relevantes para proceder aos cálculos:

- Densidade da estilha (mistura de madeiras): 330 kg/m<sup>3</sup>;
- Diâmetro interno do tambor: 1257 mm;
- Comprimento do tambor: 5000 mm;
- Diâmetro do tubo mecânico: 180 x 120 mm;
- Dados do elemento de fixação do tambor ao tubo mecânico:
  - Volume: 504 cm<sup>3</sup>;
  - Massa: ≈ 4 kg;
- Dados do sem-fim:
  - Volume: 8030 cm<sup>3</sup>;
  - Massa: ≈ 63 kg;
- Chapas de aço inox:
  - Massa: ≈ 80 kg;
- Massa das redes de crivagem: 20 kg
- Massa por unidade de comprimento do tubo mecânico: 107 kg/m;
- Massa das ponteiras de acoplamento das chumaceiras: 52 kg;
- Velocidade de rotação do tambor: 36 rpm.

Primeiro é necessário saber qual o volume que pode ser ocupado por estilha no interior do crivo, de modo a saber qual a massa de estilha no seu interior. No limite será todo o volume disponível, ou seja:

$$V_{\text{útil}} = V_{\text{tambor}} - V_{\text{componentes interiores}} \quad (4)$$

O volume do tambor é dado por:

$$V_{\text{tambor}} = \pi \times (\text{raio}_{\text{tambor}})^2 \times \text{comprimento} = 6,2 \text{ m}^3 \quad (5)$$

O volume dos componentes interiores é igual à soma de vários volumes: do tubo mecânico  $V_{tb}$  (parte interior do tambor), dos elementos de fixação do tambor ao tubo mecânico  $V_{ft}$  e do sem-fim  $V_{sf}$ .

$$V_{\text{componentes interiores}} = V_{tb} + V_{ft} + V_{sf} \quad (6)$$

$$V_{\text{componentes interiores}} = 1,27 \times 10^8 + 7,56 \times 10^6 + 802954,87 = 1,36 \text{ mm}^3 \approx 0,1 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Assim, tem-se que:

$$V_{\text{útil}} = 6,2 - 0,1 = 6,1 \text{ m}^3 \quad (8)$$

Com este valor é possível calcular a massa de estilha que pode estar dentro do crivo, sendo esta obtida pela multiplicação do volume calculado acima pela densidade da estilha:

$$\text{Massa de estilha} = 6,1 \times 330 = 2013 \text{ kg} \quad (9)$$

Sabendo a massa que pode estar dentro do crivo pode-se passar para o cálculo estrutural.

### 3.3.1 Dimensionamento pelo método de elementos finitos

O principal objetivo neste dimensionamento é certificar que os elementos de fixação do tambor ao tubo mecânico suportam os esforços exigidos. Este modelo é aproveitado também para fazer uma validação da utilização do tubo mecânico, assim como dos veios maquinados para acoplagem ao tubo mecânico, de modo a incorporar as chumaceiras de suporte.

Considera-se um modelo de elementos finitos definido a partir de uma simplificação do modelo geométrico 3D. Algumas das simplificações do modelo derivaram da elevada dimensão e complexidade da estrutura, em particular as interferências entre os contactos dos vários componentes, optando-se por modelar a estruturas sem contactos. Importa notar que esta simplificação é aceitável para uma análise global da estrutura, dado o procedimento de fabrico e ligação entre os elementos referidos, através de cordão de soldadura.

Então, para o modelo em estudo foram efetuadas as seguintes simplificações:

- Modelação em peça única. Sendo os materiais dos componentes em estudo idênticos, foi criado um modelo como peça única para anular o problema das interferências, sendo a ligação entre todos os elementos do tipo soldado;
- Tambor com maior espessura e em chapa lisa. Como as redes de crivagem não são objeto de estudo neste modelo, o tambor foi modelado como em chapa lisa e com maior espessura, mas mantendo um peso aproximado e, assim, diminuindo a sua importância nos cálculos;
- Para simulação da inclinação, procedeu-se à criação de um plano com a respetiva inclinação em relação ao eixo do crivo, onde é colocada a direção da força, em vez de inclinar o crivo na totalidade.

A Figura 28 ilustra a definição do modelo de elementos finitos, que considera o elemento sólido, tetraédrico, isoparamétrico, com interpolação parabólica, 10 nós e 3 graus de liberdade por nó, correspondentes às translações nos 3 eixos (Figura 27), o elemento SOLID da biblioteca do Solidworks, programa de cálculo utilizado.

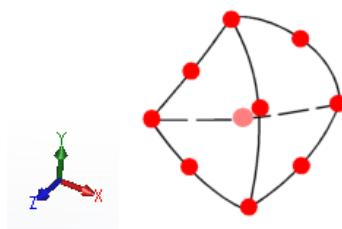


Figura 27 – Elemento tetraédrico com 10 nós e 3 GL por nó

As condições de fronteira do modelo consideram a restrição dos graus de liberdade nas direções radial e circunferencial das zonas de encaixe do veio nas chumaceiras (*fixed hide do software*). O modelo foi estabilizado na extremidade inferior do veio, onde é restringido o grau de liberdade correspondente à direção do eixo do veio.

Em termos de condições de carga, foi considerada uma força distribuída em todo o diâmetro e comprimento do tambor, com o sentido do plano de carga representado na Figura 28, representando assim a massa de estilha que pode estar dentro do crivo (valor calculado anteriormente). Complementarmente, é também considerada a força centrífuga provocada pela rotação do crivo (valor de rotação calculado anteriormente).

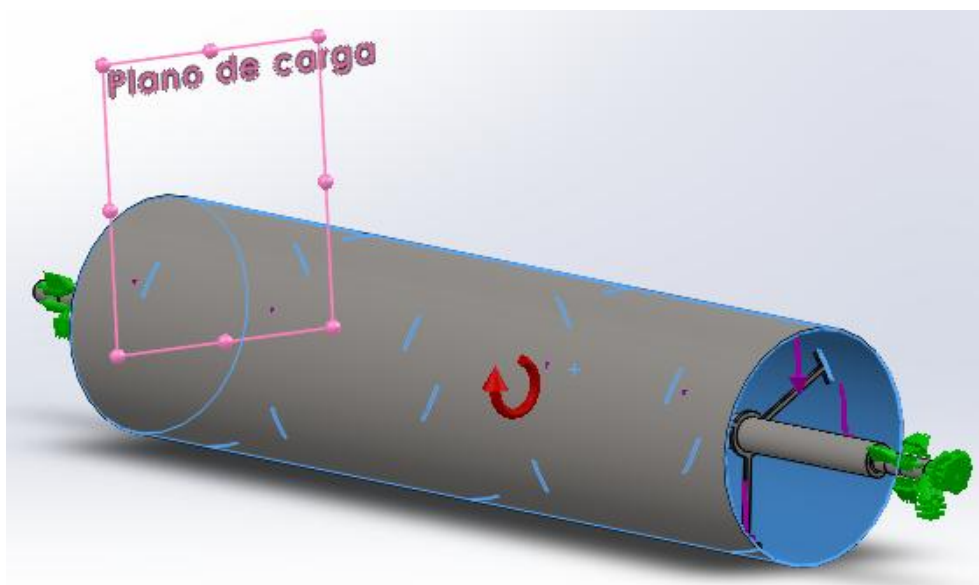


Figura 28 - Definição do modelo 3D para estudo

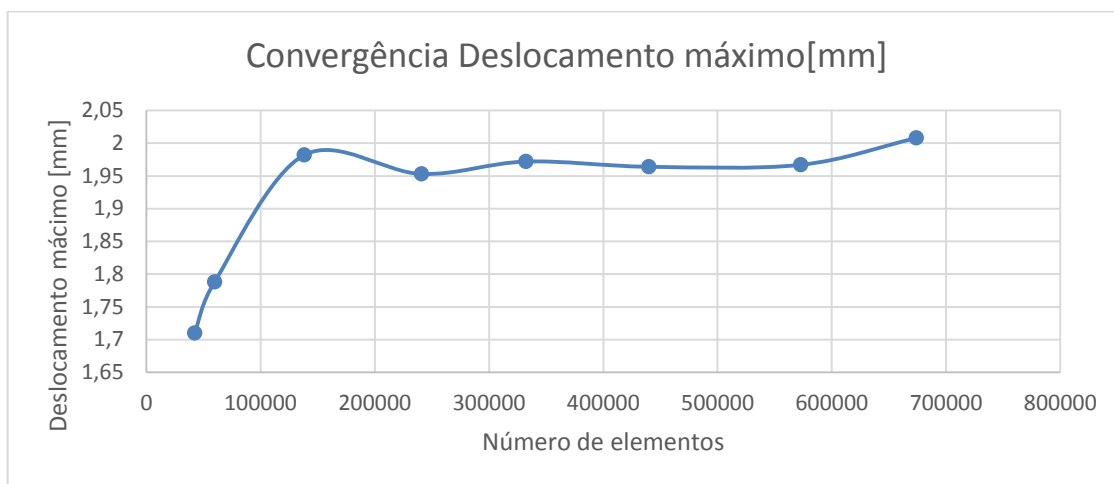
Estando a simular uma peça única, o material utilizado no estudo é o mesmo em toda a peça, denominado por AISI 1020 e tem as seguintes propriedades mecânicas:

- Massa específica [ $\text{kg/m}^3$ ]: 7900;
- Tensão de cedência [MPa]: 351;
- Coeficiente de Poisson: 0,29.

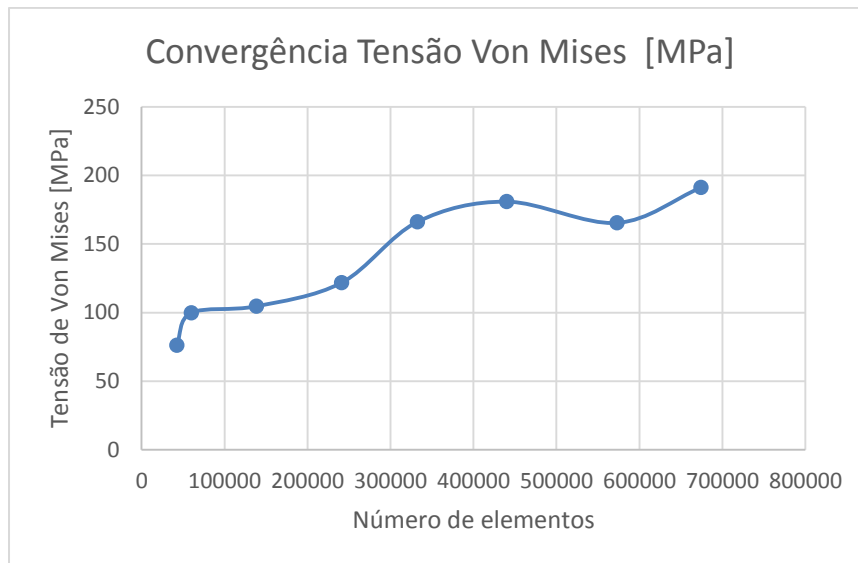


No estudo da convergência de malha, dadas as dimensões do modelo, não foi possível proceder a um ajuste automático da dimensão dos elementos (h-adaptativo do software). Assim, procedeu-se a um cálculo manual através da convergência de malha para escolher o resultado final mais indicado. Para a malhagem da peça em estudo, maioritariamente composta por elementos redondos (veios, tambor), foram aplicados controlos de malha localizados, nas zonas mais críticas em termos de concentrações de tensões e, também, nos elementos que são o objetivo de estudo (elemento de fixação tambor tubo). O tamanho do elemento no controlo de malha localizado foi o principal elemento de mudança (diminuição do seu tamanho) para criação da convergência de malha. O tamanho deste elemento é, no máximo, igual à metade da espessura do componente em causa. Neste caso, por exemplo nos elementos de fixação do tambor ao tubo mecânico, como a espessura é de 20 mm, o controlo de malha localizado iniciou-se com um tamanho de elemento máximo de 10 mm, reduzindo-o a partir deste valor. A observação da convergência de malha assentou na identificação do deslocamento máximo do modelo, assim como da tensão máxima de von Mises e a sua localização. Na Figura 29 e na Figura 30 são representados, respetivamente, a convergência de malha através dos deslocamentos máximos e a convergência de malha através da tensão máxima de von Mises.

Tal como se pode observar, o elemento tem tendência a convergir a partir de cerca de 450000 elementos. Nos deslocamentos existe uma convergência completamente visível a partir de 320000 elementos.



**Figura 29 - Convergência de malha pelos deslocamentos máximos**



**Figura 30 - Convergência de malha pela tensão de Von Mises**

Existe ainda um outro parâmetro importante na escolha deste ponto como resultado final, que é a percentagem de elementos com relação de aspeto inferior a 3 e superior a 10 e é neste ponto de malhagem que são obtidos os melhores resultados apresentados na Figura 31 e Figura 32. Assim, o modelo final de suporte ao cálculo considera uma dimensão de elemento que varia entre 15mm e 84 mm. Estes valores poderiam ser ainda mais refinados, mas é de referir que nos elementos de estudo, a relação de aspeto já é suficientemente boa. Além disso, é possível visualizar na Figura 32 que os piores valores se encontram no tambor exterior, sendo que este não é o objeto principal de estudo.

Mesh Details	
Study name	Convergencia2 Final (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points	4 points
Mesh Control	Defined
Max Element Size	84 mm
Min Element Size	15 mm
Mesh quality	High
Total nodes	1055006
Total elements	674069
Maximum Aspect Ratio	149.59
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	91.2
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	4.49
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:01:28
Computer name	JOÃO-PC

Figura 31 - Detalhes da malha

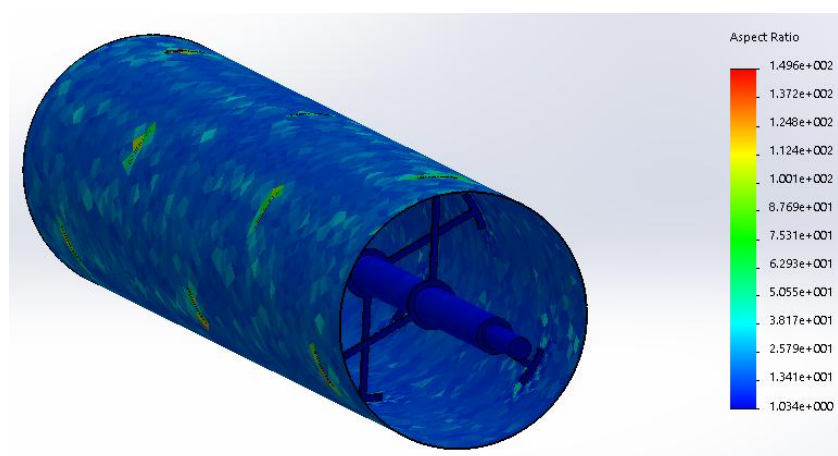
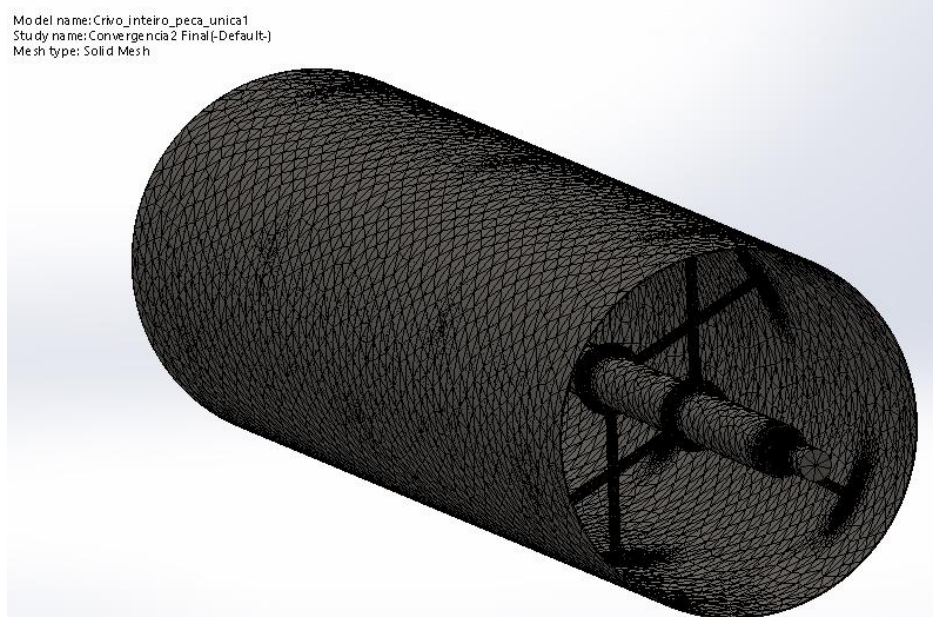


Figura 32 - Relação de aspeto

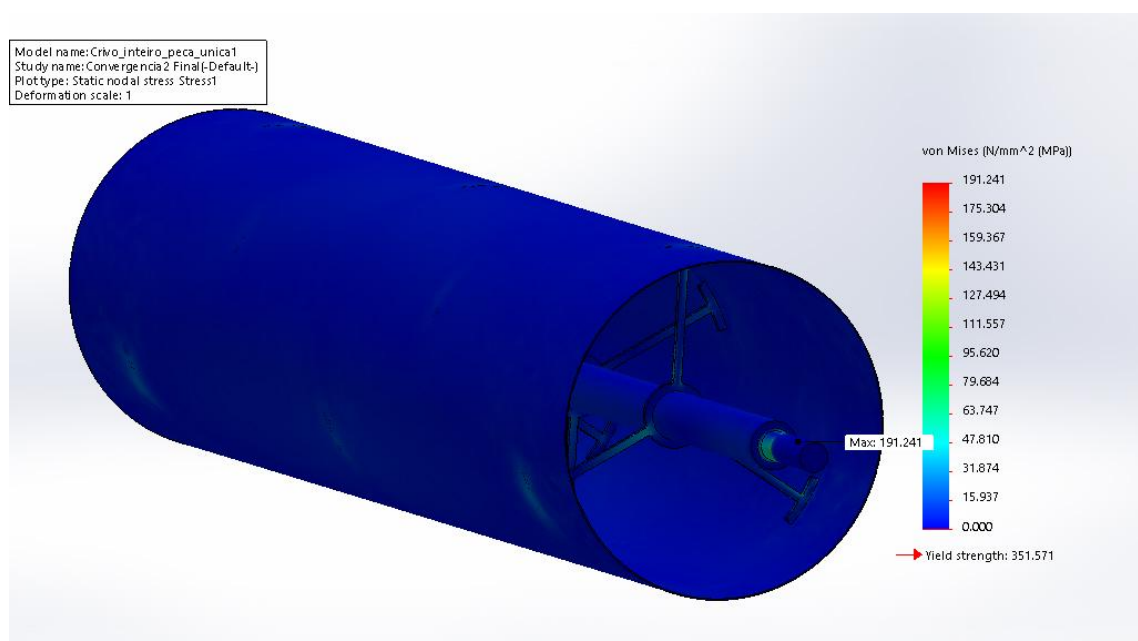
Na Figura 33 é ilustrada o resultado final da malhagem, onde é possível visualizar os pormenores do controlo de malhagem nos pontos de fixação do crivo, elementos de fixação do tambor ao tubo e no chanfro entre os dois diferentes diâmetros dos veios.



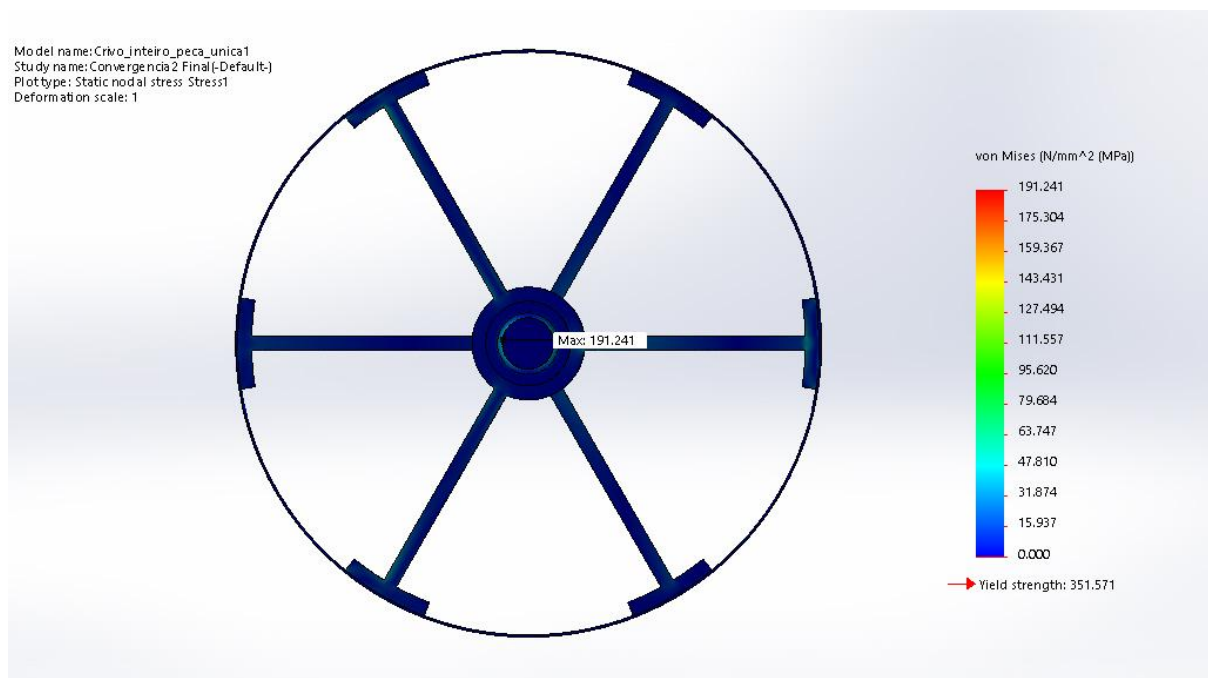
**Figura 33 - Malhagem final**

De seguida vão ser mostrados os resultados tendo em conta as considerações anteriormente descritas.

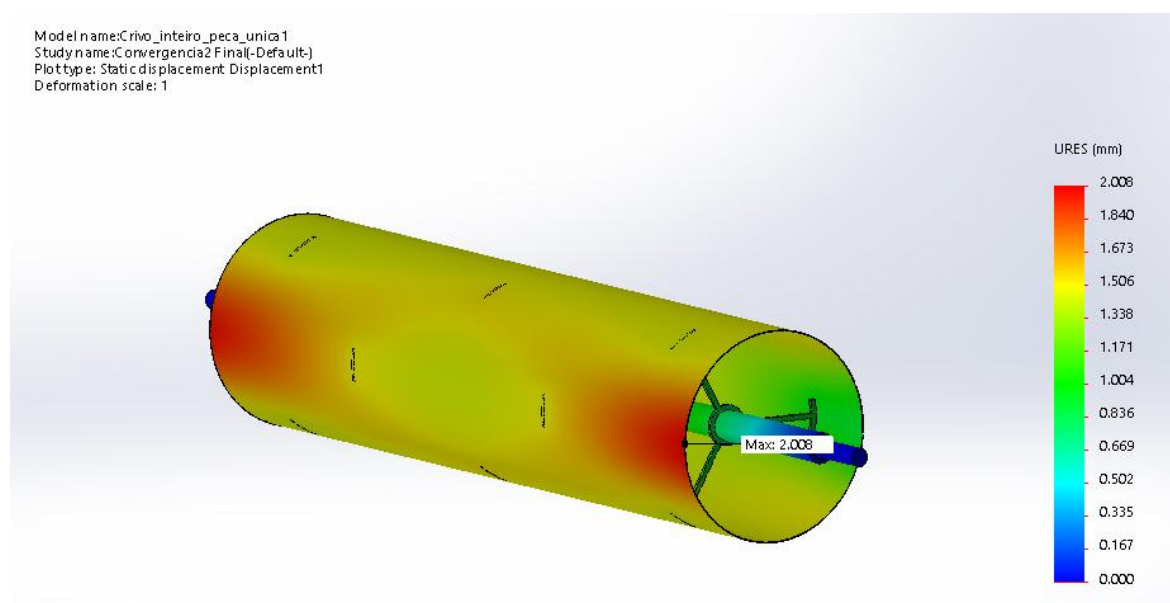
Em primeiro lugar, apresentam-se os valores de distribuição das tensões de von Mises, os resultados dos deslocamentos resultantes obtidos e a distribuição do fator de segurança ao longo do componente, considerando uma relação comparativa direta com a tensão de cedência do material.



**Figura 34 – Distribuição das tensões equivalente de von Mises [MPa]**



**Figura 35 - Pormenor da tensão equivalente de von Mises nos elementos de fixação do tambor ao tubo**



**Figura 36 – Distribuição dos deslocamentos resultantes**

Os resultados obtidos são coerentes. Analisando os resultados, é de referir que na globalidade a estrutura não excede em local algum a tensão de cedência do material, sendo o pico mais elevado da tensão equivalente localizado na fronteira do apoio criado para o modelo, como seria de prever

Em casos particulares, como os elementos de fixação do tambor ao tubo, é visível na Figura 35 que a tensão existente não ultrapassa os 50 MPa, valor afastado do limite de tensão de cedência, concluindo assim que este componente resiste ao esforço aplicado. Também o tubo apresenta valores de tensão máxima de von Mises muito afastados da tensão de cedência do material.

Analisando os deslocamentos, é perfeitamente aceitável que para uma estrutura destas dimensões exista um deslocamento numa das extremidades livres na ordem dos valores apresentados na Figura 36, mostrando que a estrutura tem rigidez adequada.

Como conclusão geral deste método de estudo da estrutura do crivo, pode afirmar-se que os elementos objeto de estudo principal com este processo conseguem cumprir com as solicitações simuladas, estando dentro dos parâmetros pretendidos.

### **3.4 Ajustes durante o funcionamento**

Neste caso, aquando da montagem e início de funcionamento do crivo, tiveram de se projetar algumas das estruturas de ajuda ao funcionamento, tais como:

- Estruturas de queda de material do tapete de abastecimento para o crivo e deste para os tapetes de transporte posterior;
- Estruturas de proteção do crivo em rotação e retenção e encaminhamento do serrim expulso pelas redes;
- Proteções ao acionamento por corrente entre o órgão motor (motor elétrico) e o órgão movido (crivo rotativo).

Todos estes pontos podem ser visualizados na Figura 21.

### **3.5 Melhorias futuras**

Uma das melhorias necessárias consiste na otimização da estrutura, como referenciado numa secção anterior, para o caso deste crivo ser replicado com uma estrutura mais compacta, mais leve e assim tornar este equipamento mais económico e rentável, mantendo a fiabilidade estrutural.

Uma outra melhoria que também deverá ser implementada no crivo rotativo que já se encontra em funcionamento, é a introdução de uma escova de limpeza das redes de crivagem (Figura 37), pois estas redes ficam colmatadas com pedaços de estilha e, por vezes, serrim húmido, não deixando assim passar o serrim.



**Figura 37 - Escova rotativa (Maia & Maia – Indústria de Escovas e Similares LDA., 2014)**

O funcionamento deste tipo de escovas é bastante simples, efetuando a limpeza das redes através do movimento rotativo contrário da escova em relação ao crivo, isto é, se o crivo roda no sentido dos ponteiros do relógio, a escova roda no sentido contrário, fazendo com que os espigões, normalmente de material polimérico, perfurem os buracos das redes procedendo assim à sua limpeza.





## 4 Desenvolvimento de um rachador

Este capítulo descreve os principais aspetos relativos à conceção em modelo 3D de um rachador, o último equipamento que se apresenta neste trabalho de projeto.

### 4.1 Descrição geral

O destroçador de madeira é limitado no diâmetro máximo dos rolos que podem entrar, devido à abertura máxima que a boca do destroçador permite (diâmetros máximos de 400 mm aproximadamente).

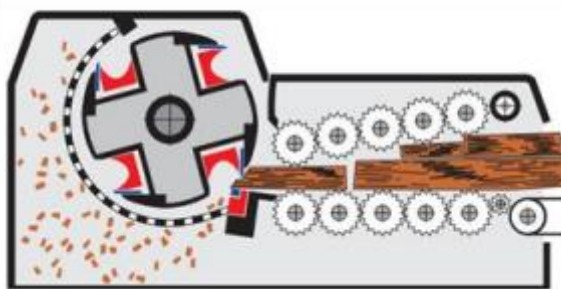


Figura 38 - Esquema de funcionamento do destroçador.

Este é um dos problemas na matéria-prima, pois a unidade industrial recebe com alguma frequência rolaria com o diâmetro superior ao suportado pelo destroçador. Quando tal sucede, tem de ser armazenada no parque, ocupando espaço, sendo matéria-prima que não pode ser processada rapidamente, aumentando assim os custos de armazenamento.

Presentemente estes rolos são processados quando é possível alugar um equipamento para os rachar antes de serem destrocados. Desta forma, corre-se o risco de estarem muito tempo armazenados no parque e, aquando do seu processamento, já estarem numa fase de decomposição (apodrecerem internamente), sendo mais uma perda de valor para a unidade industrial.

Foi então colocada a hipótese, pela direção, de projetar um rachador para estar sempre em funcionamento. Assim, quando estes rolos chegam, isolados ou misturados na outra madeira, poderão ser logo processados, valorizando assim esta matéria-prima. O objetivo do projeto deste equipamento é projetar um rachador de fácil utilização, aproveitando algum equipamento disponível no armazém de serralharia da unidade industrial, e que possa ser construído nas oficinas da mesma. Quando este equipamento for introduzido junto do

destroçador e da sua grua de alimentação, permitirá que, quando os rolos com diâmetro superior ao destroçador entram em parque, possam ser logo processados.

Como descrito no capítulo introdutório, o projeto deste equipamento tem como base os rachadores *WoodCraker*, gama L (WesttecH Maschinenbau GmbH, 2016), sendo o modelo L920 ideal para as características de funcionamento desejadas:

- Abertura para capacidade de rachar troncos com 900 mm de diâmetro;
- Capacidade fecho até 30 toneladas.



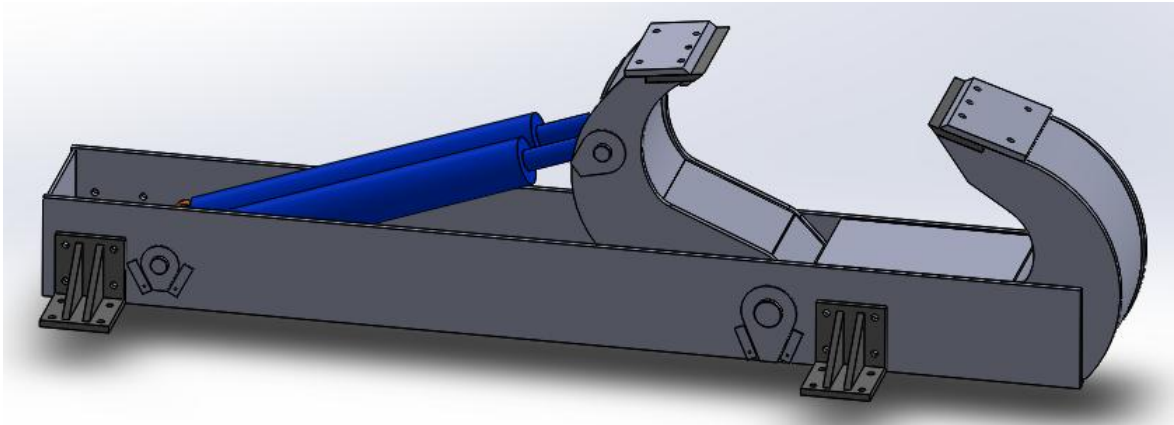
Figura 39 - Diferentes modelos de rachador *WoodCraker*, gama L (WesttecH Maschinenbau GmbH, 2016).

## 4.2 Conceção

Esta máquina teve de ser projetada de acordo com as características pretendidas mas, sobretudo, de forma a incorporar algum equipamento já existente com as seguintes características:

- Chapas de aço de construção;
  - Comprimento: 3000 mm
  - Largura: 1500 mm
  - Espessura: 20 mm
  - Tipo de material: classe C1
- Grupo hidráulico;
  - Pressão máxima de operação: 250 bar
- 2 Cilindros hidráulicos;
  - Diâmetro da camisa: 87 mm
  - Curso: 755 mm
- Lâminas de corte utilizadas no destroçador.

Com estes equipamentos e segundo os modelos acima descritos, a Figura 40 ilustra o modelo 3D projetado.



**Figura 40 - Modelo 3D do rachador**

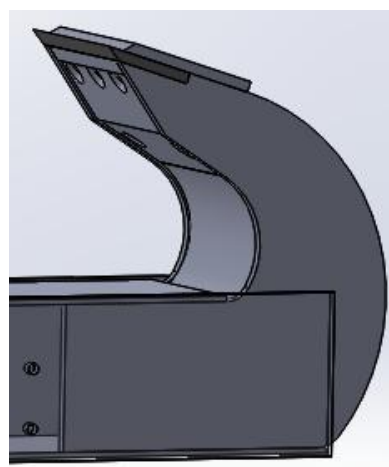
Este modelo 3D é constituído pelas seguintes partes:

1. Bases laterais de suporte: em material do tipo C1, com espessura de 20 mm, servem para suportar as garras, os cilindros hidráulicos e os elementos de fixação ao chão (Figura 41);



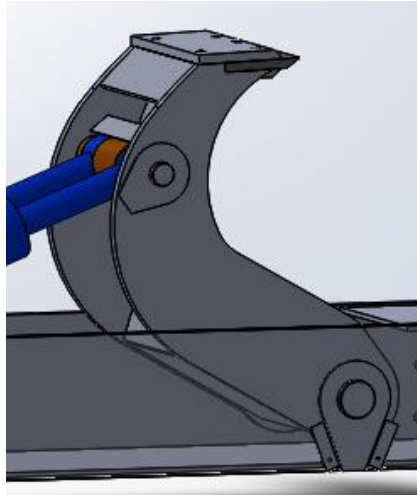
**Figura 41 - Bases laterais de suporte**

2. Garras fixas: são garras soldadas às bases laterais de suporte sendo constituídas por chapas laterais que dão a forma estrutural (chapa de 20 mm de espessura), chapas de proteção e reformo interior (chapa de 10 mm de espessura), lâmina de corte (parte escura da Figura 42) e chapas de aperto das lâminas;



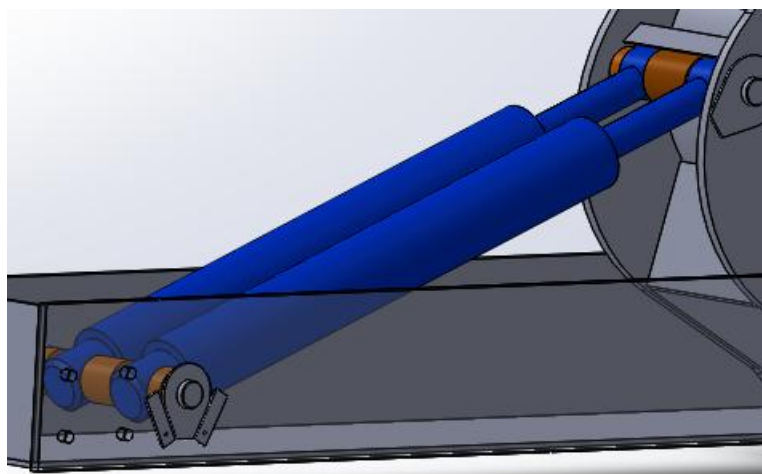
**Figura 42 - Garra fixa**

3. Garras móveis: são garras que se movimentam acompanhando o movimento dos cilindros hidráulicos devido a estarem acoplados através de uma cavilha entre os olhais dos cilindros e a furação nas laterais da garra. Para a garra efetuar o movimento pretendido de rotação, como se verifica na Figura 43, existe uma outra fixação através de outra cavilha entre as laterais da garra móvel e as bases laterais de suporte. Tem a mesma constituição da garra fixa, apenas muda a forma das chapas laterais.



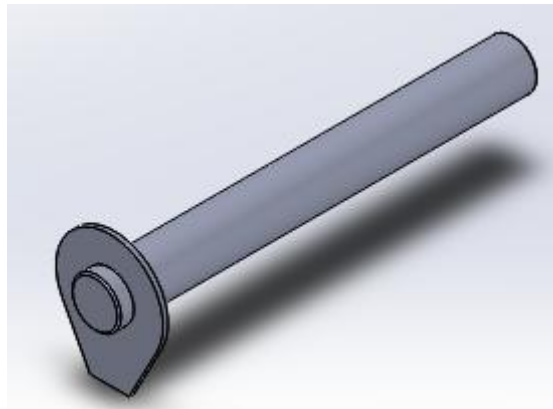
**Figura 43 - Garra móvel**

4. Cilindros hidráulicos: na Figura 44 é possível ver a forma de acoplamento e a utilização de casquilhos para separar equitativamente os dois cilindros na largura do rachador e, assim, a força exercida por cada um, mantendo o equipamento em equilíbrio. O acionamento dos cilindros hidráulicos é feito através do grupo hidráulico já descrito acima. Será utilizada uma válvula divisora de caudal para garantir que cada cilindro exerce a mesma força e tem a mesma velocidade.



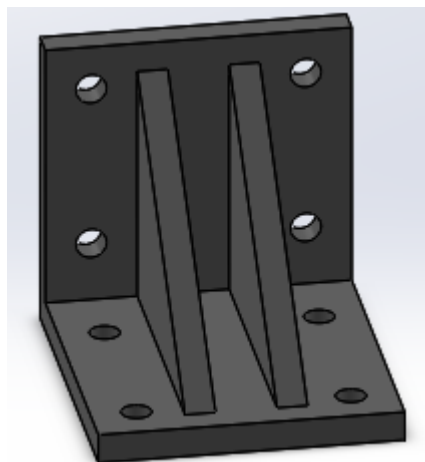
**Figura 44 - Cilindros hidráulicos**

5. Cavilhas de suporte: é torneada com comprimentos e diâmetros distintos, consoante o local de aplicação. O material que a constitui é o FR 3 (AISI: 4337) por ter uma tensão de cedência bastante elevada, de modo a suportar elevados esforços.



**Figura 45 - Cavilha base do cilindro hidráulico**

6. Elementos de fixação ao chão: são elementos aparafusados às bases laterais de suporte, que servem de apoio a toda a estrutura, fixando-se com buchas de fixação ao chão (em betão) no local onde o rachador for instalado (Figura 46).



**Figura 46 - Elemento de fixação ao chão**

Todas as chapas acima descritas serão cortadas e trabalhadas na oficina de serralharia da unidade industrial, sendo que para este equipamento apenas é necessário proceder à aquisição das cavilhas e dos casquilhos já torneados com as dimensões e materiais adequados ao descrito acima.

### 4.3 Estudo estrutural

O modo de funcionamento deste equipamento requer que as hastes das garras estejam corretamente dimensionadas, tanto em termos da curvatura que fazem ao abrir e fechar e proceder à abertura de uma tora como, em termos estrutural, têm de suportar o esforço exercido sem entrar em cedência.

Para as garras fazerem o movimento perfeito para a penetração no rolo de madeira, é necessário chegar a um entendimento entre a curvatura das garras, fixa e móvel, e do posicionamento desta última tendo em conta a abertura mínima e máxima dos cilindros hidráulicos.

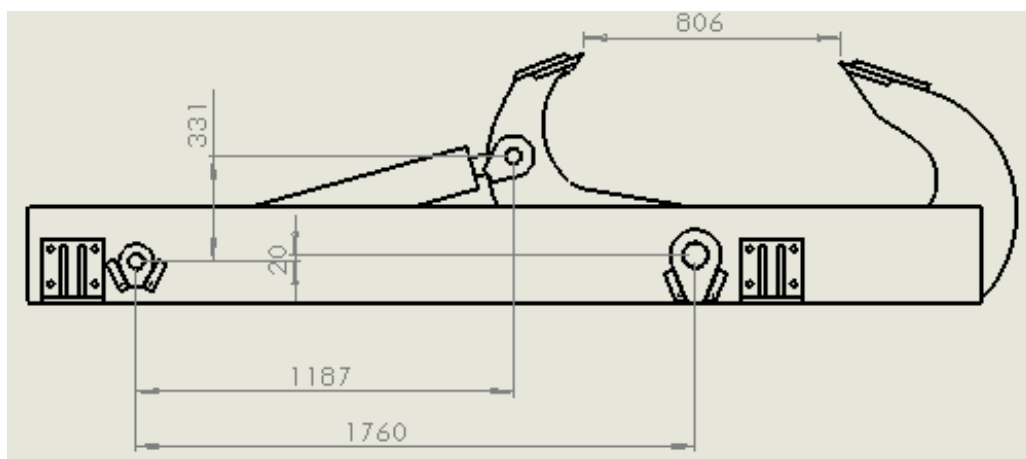


Figura 47 - Rachador: pormenores de construção com garras abertas

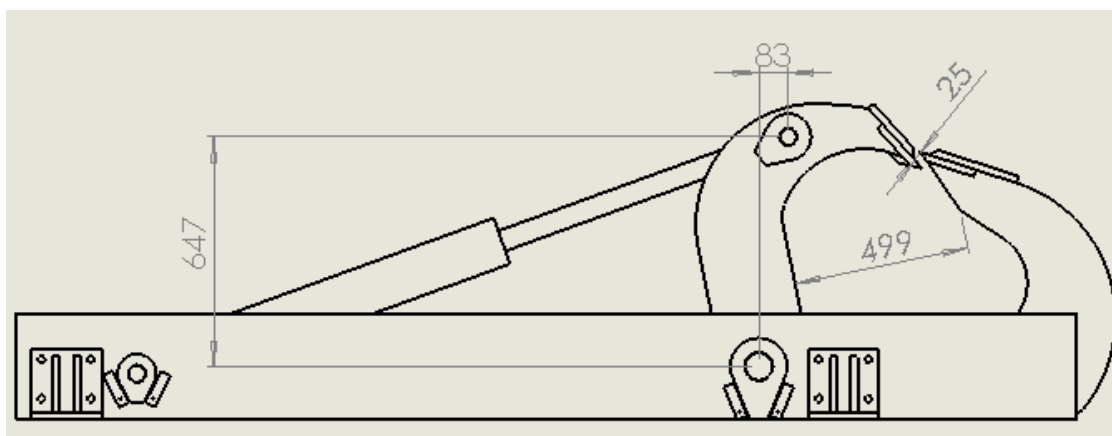


Figura 48 - Rachador: pormenores de construção com garras fechadas

Na conceção do modelo 3D foi usado o *software Solidworks®*, e para a simulação numérica foi utilizado o *software* de cálculo por elementos finitos *Solidworks Simulation®*.

Para poder proceder ao cálculo através da simulação numérica é necessário saber qual o valor de força máxima que os cilindros hidráulicos conseguem exercer.

É possível calcular essa força através do diâmetro interno da camisa dos cilindros e a pressão que o grupo hidráulico consegue impor:

$$Pressão = \frac{Força}{Área} \langle = \rangle Força[N] = Pressão[MPa] \times Área[mm^2] \quad (10)$$

Com o diâmetro interno da camisa do cilindro ( $d = 87 \text{ mm}$ ), consegue-se calcular a área:

$$Área = \pi \times 43,5^2 = 5944,68 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Assim, pode-se calcular a força:

$$Força = 25 \times 5944,68 = 148617 \text{ N} \approx 150 \text{ kN} \quad (12)$$

Este é o valor máximo que cada cilindro hidráulico consegue exercer. O rachador irá utilizar dois cilindros hidráulicos iguais, como descrito anteriormente. Então, a força total que conseguirá exercer para rachar uma tora será de 300 kN.

Para a criação de um modelo de validação da estrutura do rachador procedeu-se a várias simplificações. O objetivo deste estudo é garantir que as garras (móvel e fixa) suportam o esforço exercido devido à sua geometria.

Nas garras o elemento estrutural principal são as chapas laterais, então estas são os elementos principais de estudo. Estas serão chamadas posteriormente de chapa fixa e chapa móvel.

A simulação numérica por elementos finitos considera o elemento sólido, tetraédrico, isoparamétrico, com interpolação linear, 4 nós e 3 graus de liberdade por nó, correspondentes às translações nos 3 eixos (Figura 49), o elemento SOLID – Draft da biblioteca do Solidworks.



**Figura 49 - Elemento tetraédrico com 4 nós e 3 GL por nó**

### 4.3.1 Chapa móvel

Esta componente é a responsável por transformar o movimento dos cilindros em esforço de corte que irá fazer o corte das toras de madeira.

#### 1) Condições de fronteira, de carga e material

Neste componente as condições de fronteira consideram todos os graus de liberdade restringidos na parte superior da chapa, que irá simular o esforço que será exercido pela tora de madeira aquando do corte. Na conexão da cavilha inferior que fará o eixo rotativo da pinça, restringem-se os graus de liberdade na direção radial e na direção circunferencial. Em termos de condições de carga, é aplicada no furo onde fica acoplada a cavilha de ligação dos cilindros hidráulicos, como demonstra a Figura 50, com a direção e sentido da face de fixação da parte superior, o que simula o exercer da força máxima quando a garra está toda aberta. O valor da força colada é a equivalente à força exercida por um cilindro hidráulico uma vez que o equipamento tem dois cilindros para duas chapas laterais. O material considerado no estudo é o AISI 1020, cujas características mecânicas foram atrás descritas.

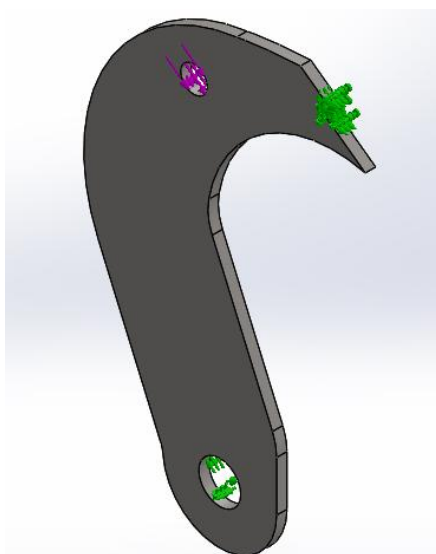


Figura 50 - Modelo de elementos finitos da chapa móvel

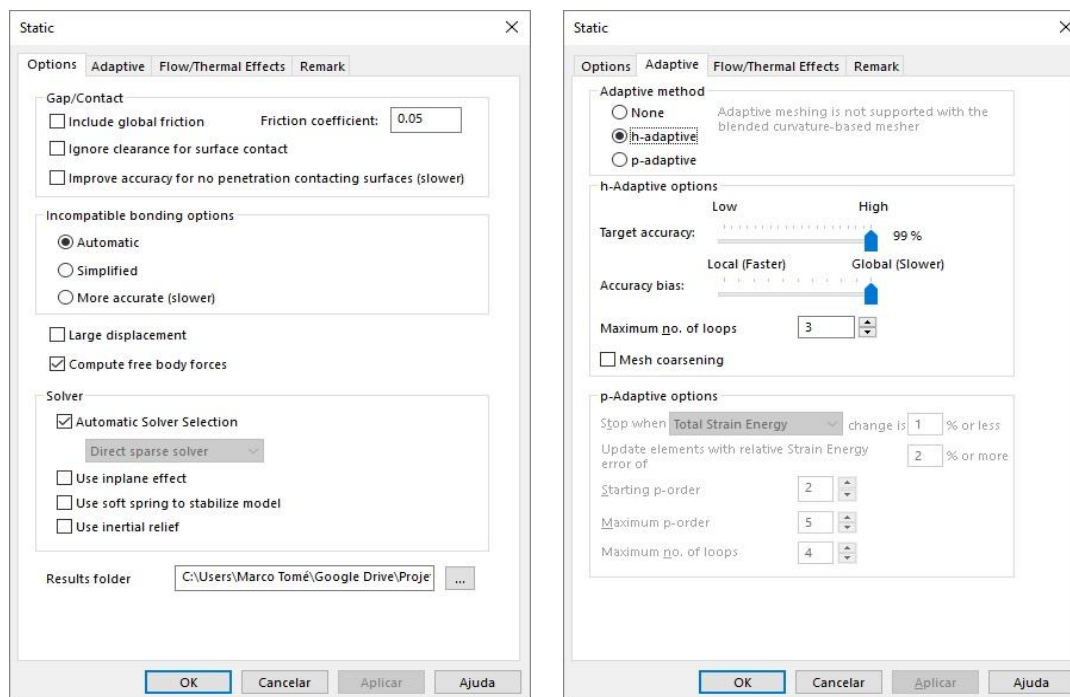
#### 2) Malhagem

Neste caso foi utilizado o método iterativo automático (h-adaptativo) para convergência da malhagem. A malhagem inicial foi baseada nos seguintes pressupostos:

- ✓ Tipo de elemento: Sólido – linear (*Solid – Draft*);
- ✓ Dimensões mínimas e máxima do elemento são, respetivamente, 6,51 mm e 32,56 mm;
- ✓ Número mínimo de elementos num círculo: 8;
- ✓ Rácio de crescimento do elemento: 1,6.

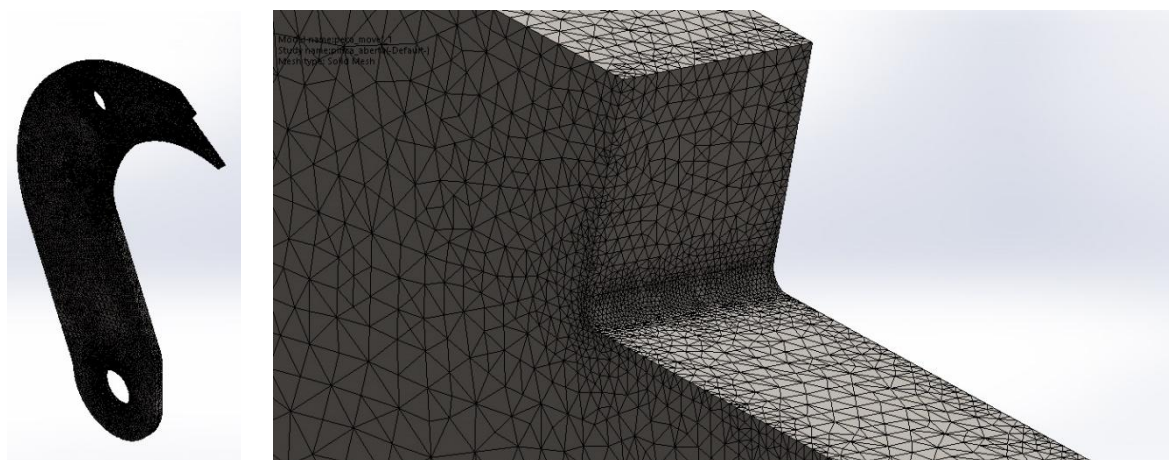


Foi também imposta uma malhagem mais refinada junto ao local onde será colocado o gume de corte, devido ao facto de esta ser uma zona crítica e também ter o fenómeno de concentração de tensões, pelo que é conveniente ter um controlo preciso da malha neste local. Foram efetuadas quatro iterações para a convergência do modelo.



**Figura 51 - Definições atribuídas no software para a convergência da malha**

A malha final do modelo é a que se representa na Figura 52



**Figura 52 - Malhagem geral (esquerda) e pormenor junto ao suporte do gume de corte (direita)**

Na Figura 53 representa-se o gráfico de convergência baseado na energia de deformação associada ao modelo.

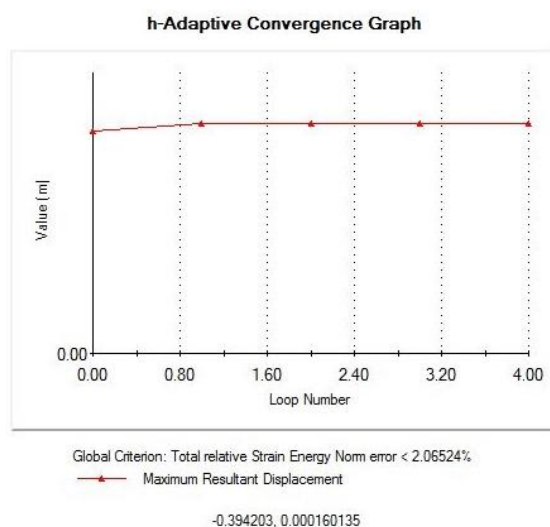


Figura 53 - Gráficos de convergência (h-adaptativo)

### 3) Resultados

Neste tópico vão ser mostrados os resultados após todos os cálculos, tendo em conta as considerações anteriormente descritas neste documento. Em primeiro apresenta-se a distribuição das tensões de von Mises (Figura 54). É necessário ter também em consideração que no pormenor das tensões temos a mesma distribuição que na chapa completa, como se pode observar, a distribuição das tensões é coerente.

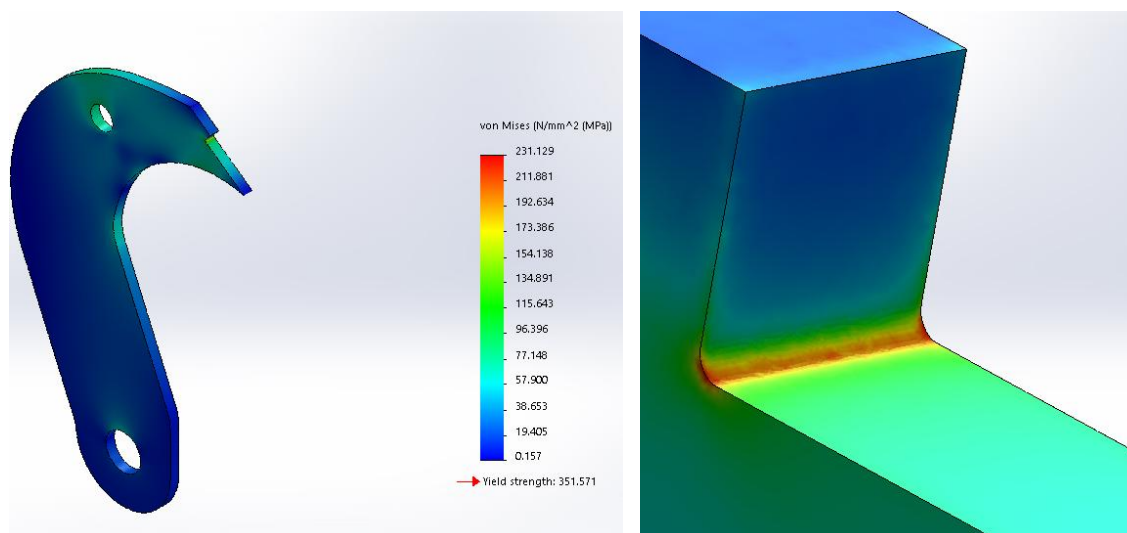
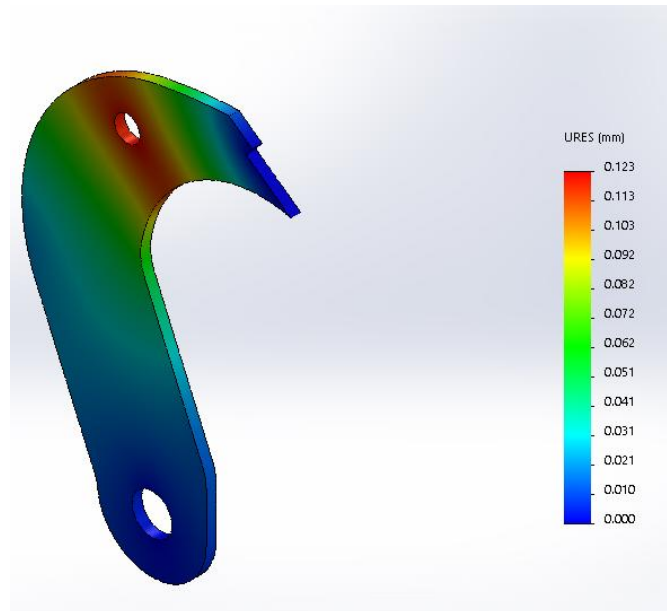


Figura 54 – Distribuição das tensões equivalentes de von Mises

A Figura 55 mostra a distribuição dos deslocamentos resultantes, evidenciando também resultados coerentes.



**Figura 55 – Distribuição dos deslocamentos resultantes**

#### **4) Discussão dos resultados**

Analisando os resultados, em particular os valores da tensão máxima de von Mises, conclui-se que a distribuição das tensões está de acordo com o esperado, verificando-se as tensões máximas junto ao chanfro onde é realizada a fixação principal da peça sendo que estas não ultrapassam a tensão de cedência do material escolhido. Pode-se ainda considerar que o componente apresenta a resistência adequada. A relação do deslocamento resultante máximo com o vão do componente mostra também que a rigidez do componente é a adequada.

### 4.3.2 Passagem de força

Para o estudo da chapa fixa é necessário saber quais as forças resultantes nos pontos de fixação superior. A Figura 56 representa os três pontos de fixação de onde são retiradas as forças para o elemento seguinte, tendo em atenção o sentido real do esforço nesse elemento. Para a conjugação destas forças de reação resultantes, as forças na direção y e z são somadas e colocadas na respetiva face da garra fixa correspondente ao esforço. Com esta simplificação admite-se que todo o esforço provocado pela garra móvel na tora de madeira é transposto para a garra fixa. Esta é outra simplificação admitida.

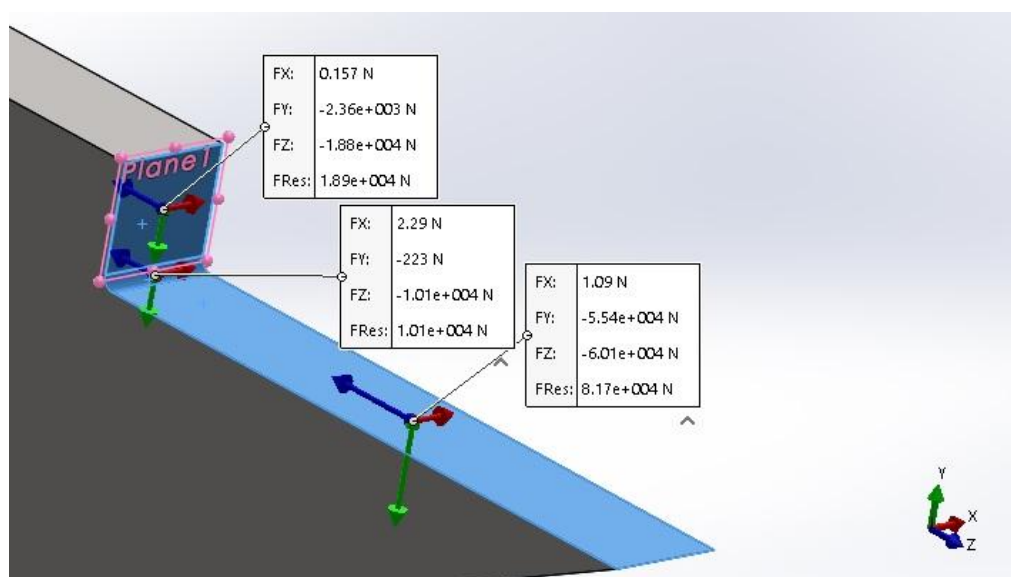


Figura 56 - Forças resultantes nas faces de fixação

### 4.3.3 Chapa fixa

O processo de cálculo para este componente é, em tudo, semelhante ao anterior. Neste caso, as condições de fronteira consideram o constrangimento total dos graus de liberdade na parte da chapa que é soldada à estrutura do rachador. As condições de carga consideram as forças colocadas de acordo com o referido no ponto anterior, onde o somatório das reações em  $z$  exercem uma força no sentido da peça e o somatório das reações em  $y$  exercem nesta peça uma força na vertical, puxando toda a peça para cima.

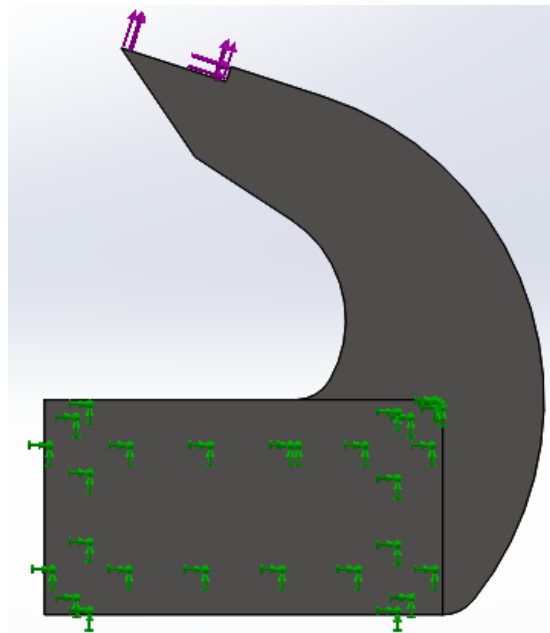
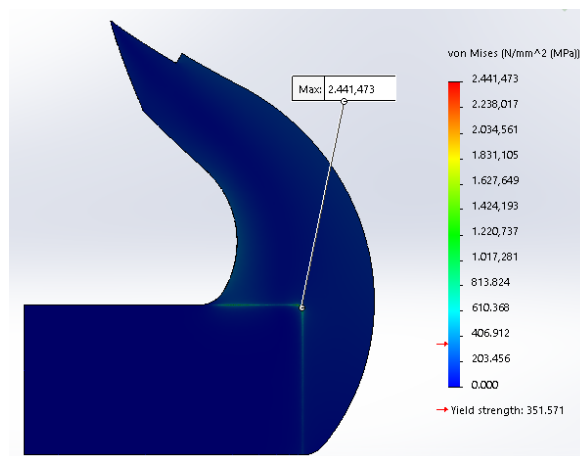
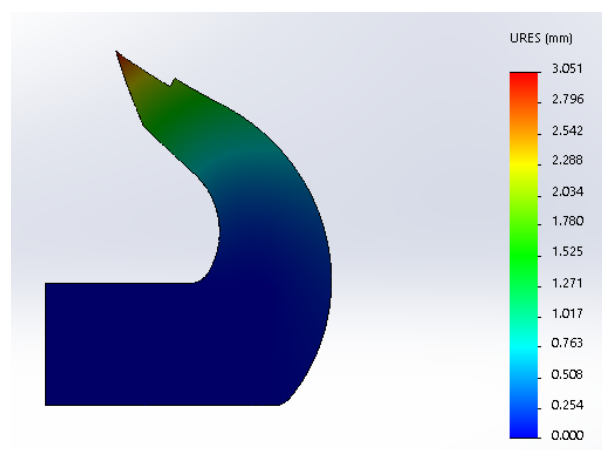


Figura 57 - Colocação das Fixações e Forças

A Figura 58 mostra a distribuição das tensões de von Mises e a Figura 59 mostra a distribuição dos deslocamentos resultantes.



**Figura 58 – Distribuição das tensões equivalentes de von Mises**



**Figura 59 – Distribuição dos deslocamentos resultantes**

Neste componente, analisando o resultado das tensões equivalentes, podemos concluir que existem tensões máximas acima da tensão de cedência do material. Mesmo podendo desprezar o ponto máximo que é um ponto de concentração de tensões devido à definição do modelo na criação da área de fixação, é possível reparar que ao longo do arco interior se distribuem tensões próximas da tensão de cedência do material. Estes resultados sugerem que a estrutura tal como está projetada pode entrar em cedência, sendo necessário um reajuste estrutural fazendo um reforço de material neste local ou alterar a geometria da garra. Contudo, será importante redefinir as simplificações do modelo ou obter capacidade computacional que consiga simular numericamente toda a estrutura não simplificada.

## 5 Conclusão

O objetivo deste projeto foi a intervenção na linha de verdes da unidade industrial, Pellets Power, em particular no crivo de processo, devido à sua deterioração bastante avançada. Com a paralisação deste crivo, foi necessário avançar o mais rapidamente possível para a implementação das soluções descritas neste projeto. Esta implementação foi conseguida com sucesso, nos dois crivos substitutos do crivo de processo antigo.

No crivo de estrelas, os conhecimentos e experiência dos dirigentes da unidade industrial prevaleceram em termos do projeto do equipamento, aliando esse conhecimento à potencialidade do desenho 3D para visualização do aspeto do equipamento antes da sua conceção, conseguindo assim um equipamento capaz de satisfazer as necessidades, tanto em termos da conceção dentro das próprias instalações como depois no próprio funcionamento.

No crivo rotativo, o processo de conceção foi o mesmo, existindo aqui algum cuidado no cálculo estrutural.

Em modo de conclusão geral, o que mais prevalece no projeto e conceção destes dois equipamentos é o desenvolvimento e acompanhamento do projeto em si, depois de ser idealizado, até ao início de funcionamento, certificando-se que este satisfaz o processo para o qual foi pensado e concebido. É daqui que são retiradas as maiores conclusões pois, por vezes, o que na teoria é válido, no funcionamento real, alguns parâmetros podem não ser os mais adequados, ou até mesmo na conceção real do equipamento podem ocorrer problemas que não são detetados aquando da conceção em modelo 3D do equipamento.

O terceiro equipamento, o rachador, ainda não foi concebido, por razões que não se prendem com o projeto. Será sem dúvida uma mais-valia para o processo produtivo da unidade industrial, tendo em conta os aspetos descritos neste documento, principalmente, pelo desperdício das características da madeira em toras ao serem armazenadas durante algum tempo.

Quanto ao projeto deste último equipamento, este deveria ser otimizado de acordo com as conclusões do estudo estrutural. Se for construído nas instalações da unidade industrial, já se dispõe de informação suficiente para, aquando da sua construção, saber onde terão de ser feitos reforços em termos estruturais.

Por último, é de referir que, sem dúvida, os projetos em colaboração com a indústria são muito mais aliciantes, pois para além do projeto em si, é possível ter contacto com toda a unidade industrial.





## 6 Bibliografia

Jocar - Fábrica de Máquina de José Oliveira Carlos & Filhos, Lda. (2016). Obtido em 28 de 1 de 2016, de <http://jocar-lda.com/equipamentos-novos/>

Maia & Maia – Indústria de Escovas e Similares LDA. (2014). Obtido em 12 de 10 de 2016, de <https://grupomaia.pt/html/produtos/tecnicos-e-industriais/>

Premier Tech Chronos. (2013). Obtido em 25 de 09 de 2016, de <http://www.ptchronos.com/pt-pt/produtos/bulk-processing-equipment/trommel-screens/>

Ramada Aços. (2016). Obtido em 21 de 2 de 2016, de [http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/c1\\_.html](http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/c1_.html)

WesttecH Maschinenbau GmbH. (2016). Obtido em 25 de 5 de 2016, de <http://www.westtech.at/en/prod/woodcracker-l/>